



简明工程热力学基础

——火电厂工程师必读

赵兴龙 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

简明工程热力学基础

—— 火电厂工程师必读

赵兴龙 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从热力学最基本的概念及热力学第一定律出发,简单明了地推导出理想气体(空气)的热力过程的公式,得出传统热力学的结论;同时对一维稳定流动进行了讨论。从实践经验出发,推导传统的一维稳定流动的公式,再回到实验,提出新的待完成的实验,来充实有150年历史的工程热力学。

本书内容生动、简洁,包括趣味思考及趣味讲解,实用性较强。可供火电厂及相关单位的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

简明工程热力学基础:火电厂工程师必读/赵兴龙编著.
—北京:中国电力出版社,2006.8
ISBN 7-5083-4503-7

I. 简... II. 赵... III. 工程热力学 IV. TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第072271号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2006年9月第一版 2006年9月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 32开本 2.25印张 46千字
印数0001—5500册 定价15.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

工程热力学基础是热能动力技术的理论上游。工程热力学的基础理论及热机工程技术，从瓦特改进蒸汽机开始，至今已有二百三十年的历史。作者总结了前人的基础理论研究及所有的工程技术经验而写成本书。

本书的实验基础是：①“活塞气缸”，空气的压缩、膨胀都可以实现可逆过程。在理论上可以做到，在实践上也可以做到，实际运行的活塞式压缩机、膨胀机与可逆过程的符合度达到88%。②气体在喷管中可流动，可实现气体的膨胀，为可逆过程，其流动效率高达99%。实验证明，气体在喷管中高速流动摩擦发热损失很大，另一方面又没有发热损失，流动效率高达99%。而气体在扩压管中流动，实现空气的压缩，则流动效率极低，无法运用可逆过程的公式计算。

根据以上两个实践基础，重新理清了热力学基础理论。

根据最基础的活塞、气缸、温差传热，摩擦损失，热力学第一定律等，推导出的新结论有：

(1) 利用《严家骅证明》的《严家骅图》的科学方法，改进了严家骅证明，证明任意气体的熵是状态函数，不需要热力学第二定律参与，证明了任意气体的熵是状态函数。

(2) 根据理想气体的熵是状态函数，可推导得出热力学第二定律的数学表达式。

(3) 由活塞气体推导出的可逆过程方程式可以运用于喷管的计算。同时也举出了不能运用可逆过程方程来计算气体流动的三个例子：①利用扩压管实现气体压缩。气体流动来

压缩气体，是个不可逆性很强的过程。②某种等温吸热的气体流动，它是个比可逆过程更理想的过程。③通过反作用力讨论气体流动，预测一种绝热减熵流动。

本书出书之前，与温州发电厂的热动专业的专家作了广泛的长时间的讨论，吸收了温州发电厂工程师们的创新成果，创新成果还向全国的专家广泛地征求了意见。

由于作者水平所限，书中的疏漏和不足之处在所难免，真诚希望读者提出批评指正。

编者

2006 年 7 月

目 录

前言

第一章 基本概念 1

第一节 活塞气缸中的气体、机械功 1

第二节 平衡态、基本状态参数 4

第三节 准平衡过程、可逆过程 5

第四节 过程曲线和压容图 6

第五节 活塞气缸中气体的循环 8

第六节 趣味思考及趣味讲解 9

第二章 热力学第一定律 11

第一节 功、内能、热量 11

第二节 热力学第一定律的实质 12

第三节 气体的热力学第一定律的表达式 13

第四节 气体流动的推进功、焓 14

第五节 气体稳定流动时的热力学第一定律表达式 15

第三章 理想气体热力过程 18

第一节 理想气体状态方程 18

第二节 传热无温差概念的理解 19

第三节 理想气体的比热容 19

第四节 理想气体的内能、焓、熵 21

第五节 《严家骅证明》的科学方法 24

第六节	计算式 $\int_{i-2} \frac{dq}{T}$ 与熵增	24
第七节	理想气体可逆过程计算公式	25
第八节	趣味思考及趣味讲解	28
第四章	热力学第二定律	31
第一节	自发过程	31
第二节	热力学第二定律的来历及表述	31
第三节	热力学第二定律的数学表达式	33
第四节	热力学第一定律与热力学第二定律的关系	35
第五节	卡诺循环、卡诺效率	37
第六节	热力学温标与热力学第零定律	39
第七节	热力学第三定律	39
第八节	趣味思考及趣味讲解	40
第五章	气体的流动	42
第一节	一维稳定流动的基本方程式	42
第二节	稳定流动的实验知识	44
第三节	与实验知识吻合的喷管计算理论	46
第四节	燃料在喷管中燃烧放热的简单计算模型	50
第五节	喷射体的反作用力讨论	54
第六节	气体喷射的几个实验	57
第七节	趣味思考及趣味讲解	60
参考文献		65
后记		66

第一章

基本概念

第一节 活塞气缸中的气体、机械功

一、本书的一些基本概念

- (1) 比体积：单位为 m^3/kg ，符号为 v 。
- (2) 压强：也称作压力，单位为 Pa ，符号为 p 。
- (3) 温度：采用热力学温标。

(4) 理想气体的状态方程： $pv=287T$ 。这是个实验公式。对照空气的热力数表，根据 p 、 v 查得的 T 与由状态方程求得的温度 T 数值很接近。

本书只讨论空气，并且把空气当作理想气体。因为只讨论 1kg 气体，因而今后提到的熵、焓、内能等的“广延量”都看成是比熵、比焓、比内能等。

二、功的概念的历史来源

鱼潜水中，鸟翔空中，马奔腾于草原……。力学经验、力学知识，动物生之俱来。人类依靠生之俱来的力学知识，在牛顿之前，在阿基米德之前，就有了弓射、马骑、舟船，建造长城、宫殿，挖掘运河，兴修水利工程……。阿基米德提出浮力定律，虎克提出弹簧的力学规律。到了牛顿时代，力学知识得以完善，力学如同欧几里德几何一样成为了科学。

工程热力学有自己的研究范畴。每一门学科都要对研究对象作理想化处理，就是抓主要的，而把次要的摆在一边。

工程热力学以自己的研究对象的特点定义力。

什么叫力？答：弹簧秤可以测量的，就叫做力。弹簧秤不能测量的就不是力。这个问答定义了力，这是我们在日常生活中、机械工程中指出的力。

承受力的物体，可以是弹簧秤，也可以是木头、石头。人要碾米推磨、要打水拉绳，还有犁田、推车。从这些工作中总结出：克服力的作用，移动一段距离，对我们人类的意义很大。力乘以距离（在力的方向上移动的路程）定义为功，这个定义出在牛顿时期（在牛顿之前，还没有功的概念）。这样定义的好处在于把功与动能联系在一起。质量乘以速度的平方的一半等于动能，动能与功的单位相同。动能可以做功（提水、推磨等），势能与功都可以让物体运动而产生等量的动能。功可以转变为热量，而热量转变为功或动能，是通过人类的智慧，依靠发明创造来逐步实现的。

三、气体做功

在工程热力学的研究范畴内，石头、木头的体积不会变化，气体的体积可以变化。

我们只讨论 1kg 气体，气体在容器中，就是 1kg 气体在活塞、气缸构成的容器中，如图 1-1 所示。

拉动活塞，气体的体积变大，这时，气体对外做功，气体的温度要下降；或者气体要从外界吸收热量，才能保持温度不下降。

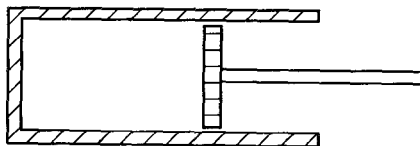


图 1-1 1kg 气体在气缸中

推动活塞，气体的体积缩小，这时外界对气体做功，气体的温度要升高；或者要向外散热，才能保持温度不升高。如果外界的压强大于气缸中的压强，拉动活塞，气缸中的气体体积增大，仍是气体对外做功，气体的温度下降。

四、气体做功的公式

1kg 气体，体积增大是气体对外做功；体积缩小是外界对气体做功，这时就称气体做了负功。

“力乘以距离”称为功。如图 1-2 所示，活塞的面积乘以活塞气缸中气体的压强就是力，再乘以活塞移动的距离就是功。图 1-2 中 1kg 气体所做的功可用式 (1-1) 表示，即

$$w = \frac{1}{m} p A L = p \Delta v \quad (1-1)$$

式中 w ——气体所做的功，J/kg；

p ——气体的压强，Pa；

m ——气体的质量，kg；

A ——活塞的面积， m^2 ；

L ——活塞移动的距离，m；

Δv ——气体比体积的变化， m^3/kg 。

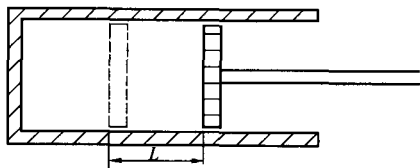


图 1-2 气体做功示意

气缸中气体静止不动，各处的压强、温度具有相同的值，这时称作准静态（或平衡态）。只有在准静态（平衡态）下，才有唯一的压强。当气体比体积增大 Δv 时，活塞运动很慢，

可以认为是由各平衡态过渡的，各处都具有相同的压强 p ，但随着体积的增大，压强仍然变化。所以式 (1-1) 只能写成微分式 $\Delta w = p_i \Delta v$ ，此时对式 (1-1) 可作微分式理解。

式 (1-1) 写作积分式为 (参见图 1-3)

$$w = \int_{1-2} p dv \quad (1-2)$$

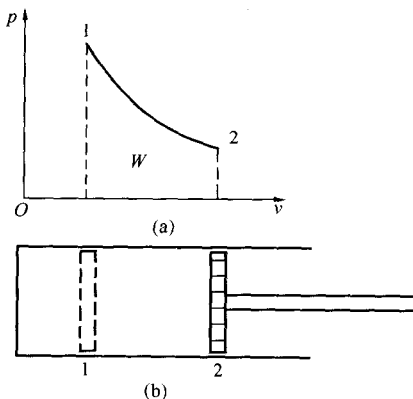


图 1-3 示功图

(a) 压容图；(b) 气体在活塞气缸中做功示意

由于压强是变化的，确定了压强与比体积的函数关系就确定了曲线 1-2，曲线 1-2 下方的面积是功。

第二节 平衡态、基本状态参数

研究 1kg 气体在活塞气体构成的容器中。气体在气缸中没有气体的流动（如没有对流产生的风及活塞快速运动产生的气体振荡冲击），各处温度均匀，各处压强相等，就称

作平衡态。平衡态时可测出气体的状态参数。

(1) 比体积。即 1kg 气体的容积。本书研究 1kg 气体，所以比体积就是此时的活塞气缸构成的容器的容积，单位为 m^3/kg 。

(2) 压力。在热力工程中，压力一般就指物理概念压强，单位为 Pa (帕)。

1Pa 就是 1m^2 面积上作用着 1N 的力。本书所指的压力是绝对的压力，区别于通常压力表的表计压力。

(3) 温度。 T 为热力学温度，绝对温度，单位为 K 。

温度 T 可以这样理解，由物质（如空气、水蒸气、氮气、液氮）的热力数表定义。如已知空气的压力为 0.1MPa ，比体积为 $10\text{m}^3/\text{kg}$ ，查空气的热力数表就确定温度 T 了。这样定义的温度范围低至零点几开，高至数千开。

第三节 准平衡过程、可逆过程

一、准平衡过程

气体从一个状态（温度、压力、比体积等参数）到另一个状态（温度、压力、比体积是不同值）是缓慢过渡的，也就是说，在变化的过程中各参数都是可以测量的或近似可以测量的，就认为是准平衡过程。

二、可逆过程

时间总是在不断流逝。宇宙的演化、人的成长、事件发生的过程，都是不可倒回去的，这是不可逆过程。工程热力学不是哲学，它研究的是能量转换时的可逆和不可逆。

砖头从斜面滑下来，就不能自动地再升回斜面高处，这是不可逆过程；同样，摩擦发热，热不能再转换为功（动

能、势能、功)，也为不可逆过程。

铁弹子落在花岗岩地面上，蹦得与原来一样的高度，是可逆过程（近似理想的情况下），即动能转换为势能可以是可逆过程。

高温物体向低温物体传热，这是不可逆过程。因为不能反过来自动地由低温物体向高温物体传热。

工程热力学定义的可逆过程：热量传递时，没有温差；气体没有内外摩擦，即气体的体积、温度、压力的变化是平衡态过渡的，没有内部流动（如对流）的摩擦发热损失，活塞与气缸也没有摩擦发热损失。

总之，可逆过程简单地定义就是：传热没有温差，过程没有摩擦。

工程热力学研究理想热机，是以可逆过程为基础的。在哲学上认为没有可逆过程，而热机研究上是存在可逆过程的，因为存在着可无限接近于可逆过程的过程。如传热温差小于1、0.1、0.01K，仍认为可以进行传热，摩擦损失也可以做到越来越小。可逆过程是热机工程理论的一个定义，它与哲学所指的不可逆无关。

第四节 过程曲线和压容图

气体在“活塞气缸”中体积增大，按准静态、平衡态过渡。随着体积的增大（或缩小），压力、温度也变化了，热力过程就是指这种变化的规律。

气体（质量为1kg）的体积就称作“比体积”。比体积 v 、压力 p 和温度 T 是气体的状态参数。任何气体 v 、 p 、 T 三者的关系由隐函数 $f(v, p, T) = 0$ 确定。空气作为理

想气体，由状态方程确定，即 $pv=287T$ 。

状态方程是二元函数。气体的状态由“二元”确定。热力过程是一元函数，热力过程确定了，温度或压力随着比体积变化的关系就确定了。

研究工程热力学，理想化之后的热力过程有：等温过程、等压过程、等容过程、绝热过程，还有“多变过程”。

热力过程是一元函数，利用活塞气缸准静态、平衡态的定义，很容易推导出一元函数的方程式。一元函数的方程式画在坐标上就是过程曲线。以压力为纵轴，比体积为横轴的过程曲线就是压容图。图 1-3 (b) 即为等温过程在压容图上的过程曲线。

等温过程就是气体在活塞气缸的容器中，慢慢移动活塞，让气体体积变大而气体的温度保持不变，这是气体吸热的过程（若体积变小，则气体放热。吸热是指从外界吸热，放热是指向外界放热）。

等温过程的过程方程式为 $T = \text{常数} = T_1$ ；状态方程式为 $pv=RT$ ($R=287$)。

以上两个方程式只有两个未知数，所以可求出两个未知数的“一元函数”关系。

将 $T=T_1$ 代入状态方程得到： $p=\frac{287T_1}{v}$ 。这是等温过程的过程方程式，这里 T_1 是常数，它指出了压力与比体积的一元函数关系。

因为功的公式为 $\Delta w = p_i \Delta v$ ，用等温过程的过程方程式及 p 与 v 的函数关系，就求出了气体做功公式，即

$$w = \int_{1-2} \Delta w = \int_{1-2} p_i \Delta v$$

$$= \int_{1-2} p_1 dv = \int_{1-2} \frac{287T_0}{v} dv = 287T_0 \ln v_2/v_1$$

因为等温过程是吸收热量的（体积增大）。理想气体的实验证实：温度不变，气体的内能不变。所以吸收的热量等于做出的功，因而等温过程吸收热量的公式为

$$q = 287T_0 \ln v_2/v_1$$

用以上的方法，可得出其他热力过程（等压过程、等容过程、绝热过程、多变过程）的过程方程式。推导的前提是可逆过程，就是“传热无温差，过程无摩擦”。

等温可逆吸热可理解为温差 10、1、0.1K 的近似的等温吸热，也可理解为气体本身在放热，而仍保持温度不变。

第五节 活塞气缸中气体的循环

以制冷原理为例来讲循环。

蒸汽机发明 100 年，汽油发动机也已经发明之后，人类才发明了制冷机。其实，制冷的原理比热机要简单得多。所以，从制冷原理来理解循环更简洁。

如图 1-4 所示，拉动活塞气缸中的活塞，气体体积增大，这时气体对外做功，气体的温度要下降，这就是制冷，可向外界吸收热量。压动活塞，让气体恢复原来的较小体积，这是外界对气体做功，气体的温度升高，高于户外温度，这时可向户外放热。放热之后，让气体温度降到原来的温度。再拉动活塞，又可以降温。制冷就这样连续不断地拉动活塞、压动活塞。制冷原理可概括为：拉动活塞，气体体积增大，温度下降；压回活塞气体体积缩小，温度升高。温度下降向低温吸收热量，温度升高向外界放出热量。

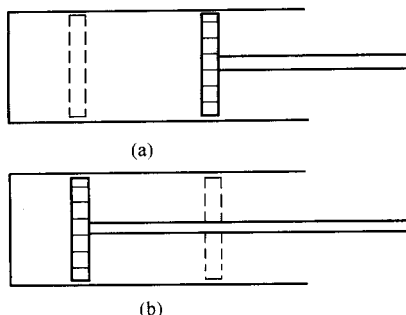


图 1-4 制冷过程示意

(a) 拉动活塞，然后把气缸置于低温环境，向低温吸收热量；(b) 压缩活塞，然后把气缸置于高温环境，向高温放热

第六节 趣味思考及趣味讲解

一、制冷的循环

图 1-5 中，空气从进口流入，从出口排出，这也是一个循环：即空气从大气到大气。这个循环可用电动机带动叶轮旋转而产生。

1 所指的壁面温度下降。因为这一段空气的压力下降，流速增大，比体积增大。比体积增大是气体对外做功（这里表现为气体比体积增大，对气体本身做功而增加动能），温度下降，所

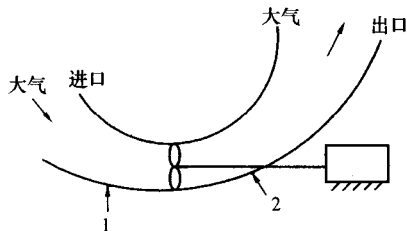


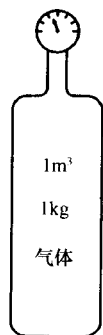
图 1-5 最简单的制冷机

以壁面的温度下降。

2 所指的壁面温度要升高。因为把气体排出到大气，必定要提高压力，压力增大，比体积减少，气体吸收功，而使温度增高。所以图 1-5 的气体流动是最简单的热力循环，是一个制冷或热泵的热力循环，只是没有工业实用价值而已。

二、温度的测量

设计一个压强计太简单了，只需一根水银柱或一根弹簧管就可以。测量比体积也很容易。



现在的任务是设计一个温度计。初看很容易，细想有点难。其实也只需要一个压力计。温度计可用一个压力表改装而成，如图 1-6 所示。腔内的容积为 1m^3 ，装有 1kg 空气。压力表加一圈温度的刻度。在空气的热力数表（比体积 $1\text{m}^3/\text{kg}$ 的一栏）中找出压力与温度的对应值，这就是温度表了。

工程热力学经过 100 多年的发展，各种物质的热力数表已经很完善。用水蒸气、氦气或水银作介质，都可作出温度表。用这些不同介质制成的温度表测量某物体的温度得出的是同一个值。完成了制作温度计的任务，就知道了温度的真实的定义：①是物质的热力数据表定义了温度；②由物质的热力数据表定义的相同的温度不会产生自动的传热。具体而言：空气的热力数表定义的 500K 与氦气的热数表定义的 500K 是同一个值。

图 1-6 压力表
改成的温度计