

公理化热力学 的数学基础

赵兴龙 主编



哈尔滨工业大学出版社

公理化热力学的 数学基础

赵兴龙 主编



哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书把热力学公理化。内容包括热力学基本概念,基本公理,热力学第二定律的数学公式克劳修斯方程式的推导。

本书让热力学第二定律从独立的公理变成了一个推导的定律。热力学第二定律的独立性被推导的同时,看到某些气体流动为遵守牛顿力学定律而必作出过程功 $W > Pdv$ 。而气体流动,正是大规模热能发电的唯一方式,其对热能动力工程的指导意义巨大。

数学,物理热力学,工程热力学这用数学改造物理热力学让人又一次看到数学对物理的巨大作用。也让人类继欧氏几何、牛顿力学之后迎来了另一门公理化学问——公理化热力学。

热力学结论是人类对自然的基本认识。热力学结论已让今天的工程动力机械达到很高的水平。公理化热力学将让人类认识翻新,人类将进入无限美妙的境地。

图书在版编目(CIP)数据

公理化热力学的数学基础/赵兴龙主编. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2010.7

ISBN 978 - 7 - 5603 - 3040 - 2

I. ①公… II. ①赵… III. ①公理(数学)-热力学
IV. ①0414.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 108239 号

策划编辑 刘培杰 张永芹

责任编辑 杨冰皓 尹 凡

封面设计 孙茵艾

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 850mm × 1168mm 1/32 印张 3.75 字数 85 千字

版 次 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 3040 - 2

定 价 58.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序 言

2006年9月,中国电力出版社出书《简明工程热力学基础——火电厂工程师必读》(以下简称“必读”)。“必读”讨论理想气体,用“活塞气缸”的基本力学规律推导出热力学第二定律的数学表达式。

被中华人民共和国知识产权局专利复审委员会称为《共产主义生产力理论,实践的普及与学术》这一资料(以下简称“教材之二”)更进一步发挥“必读”创新。仅用60字,彻底证明任意气体的熵是状态函数。于是,让热力学成为公理化热力学。

指出了“活塞气缸”的力学规律推导热力学第二定律,那么,热力学第二定律用在“活塞气缸”的热机中是正确的。

欧氏几何是公理化学问。牛顿力学,也是公理化学问。一门科学的学问,成为公理化学问之后,才是成熟的学问。热力学,在“必读”出书之前,在“教材之二”传播之前,还是“经验的学问”,我们的前人还没有智慧与学识让它公理化。把学问公理化意义巨大。

“必读”、“教材之二”已经在工科的热力学课程任课老师中广泛地传播。在2007年,2008年,2009年三次全国工程热物理学会的年会上,很多专家都拿到了这些资料。工科热力学进步,要影响物理界的热力学教育,为促进这一进程,需要数学帮助。

回顾牛顿力学,首先是由牛顿之“三大定律”及反作用定律作为公理;然后,运用数学、发展数学推导了全部。今天,数学已充分发展,公理化热力学,运用现有的数学。

力学,与人们日常行为息息相关。走路,划船,甚至呼吸空气,都用到力学。人们很少读书,也具有丰富的力学经验。很容易明白力学的公理及必要的概念。

热力学,也与人们的生活、生产息息相关。但是,热能动力,从发明蒸汽机开始,才两百多年。没有深入思考与学习,就不很明白其公理与相关的概念。而这些是热力学公理化所必须的知识。由此,本书的编排采用了“教材之二”的基本内容,让数学界复习一次理工科大学的课程中的热力学内容,然后让数学界看到,运用哪些数学内容,让热力学公理化。牛顿力学的宏伟大厦,是一个时代的数学家们发展的。今天,公理化热力学的雏形正需要数学家去完善,发展及宣传给物理界。

用以下论述,作为本书的导读。

公理化的思想

回顾数学史——两条直线相交,对顶角相等。剪下比一比,的确对顶角相等。没有任何人怀疑对顶角相等,所以对顶角相等是公理。

我们现代人,学问多了,知识提高了,已不把对顶角相等当作公理了。因为,我们发现一个更简单直观的、更普及的等量减等量相等。

于是,我们现在的初中几何,是证明了对顶角相等的。证明:对顶角这两个角,都是一个平角减去一个相等的角,所以相等。

这是一个故事,却是数学史的真实事件。它告诉我们,很直观的东西,可以当作公理。当发现更直观更不可动摇更普及的东西时,就以它为公理而进行推导。而原本认为公理的东西,成为推导的定律。推导的定律,比公理更强大,更令人信服。

机械能守恒定律不是公理

我们也看科学史。最聪明的人,文艺复兴时代的人类大师达·

芬奇,他画出了一个永动机装置,是机械能转换装置。可见,连大师都不相信机械能守恒定律,你怎么可以作公理呢?直到牛顿“自然哲学的数学原理”被人资助出版,牛顿力学体系即“公理化力学”的完成,才由牛顿力学的基本公理,基本概念推导出了机械能守恒定律。这个时候,机械能守恒定律才强大的如同日、月、星辰的运行一样,不可动摇。这个时候,西方专利局才停止了对永动机专利的申请。

能量守恒定律是公理

能量守恒定律与机械能守恒定律完全是两码事。机械能守恒定律,是指动能、势能、功这三者的转化,牛顿力学推导了机械能守恒。而能量守恒定律,是指物体的内能,热能,机械能,这三者的总量不变。

能够成为公理,要具备两个条件,一是很简单很容易理解。二是找不到更简单更容易理解。能量守恒定律,作为公理,确实很简单,很容易理解。焦耳对功的热当量测定,产生了能量守恒定律,就作为公理起,至今没有任何一个人,想尝试违反能量守恒定律的。如无数永动机设想中,就没有如把水温升高不吸热,不用机械功的。由此就可见,能量守恒定律是公理。

总结 1. 对顶角相等不是公理

机械能守恒也不是公理。它们是推导的定律,也强大如公理。能量守恒是公理。因为,热功当量测定之后,被每一个人接受。并且,能量守恒定律,无法由更简单的认识推导。

总结 2. 热力学第二定律不是公理

这个道理很简单,人类做出了无数的第二类永动机的设计,这说明它不是被人显而易见的道理。

可是,你把热力学第二定律当作定律,历史至今没有人推导过

它。所以,今天推导出热力学第二定律,它缜密了人类的思维。

总结 3. 三个公理推导了热力学第二定律

公理一:热力学第一定律(能量守恒定律)

公理二:热量从高温传递低温物体

公理三:牛顿力学原理“活塞气缸”的基本力学规律

现在问你,热力学第二定律是公理吗?该答:不是公理,因为科学史,有无数人作违背第二定律的永动机尝试,就是无数人认不清是公理。不能显然被普遍的人所认识的道理不能称为公理。

总结 4. 公理化热力学的三大公理

公理一:热力学第一定律

公理二:高温向低温传热

公理三:“活塞气缸”的力学规律,机械功(过程功)微元功 $\omega \leq p dv$

这三个公理,立即推导出热力学第二定律,这就是传统热力学的全部。热力学第二定律,就是永动机不可能有。

三大公理推导出热力学第二定律,一个重大创新就是 60 字证明任意气体的熵是状态函数。这个证明已发表在网及“教材之二”中。

如同欧氏几何去掉一个公理(平行线公理)就成为非欧几何一样,公理化热力学离开了“活塞气缸”果然是一个新的热力学。

当今的汽车发动机是“活塞气缸”,而更大功率的飞机、火箭、发电工程的热力动力都是“气体流动”。

总结 5. 气体流动热力学也有三大公理

公理一:热力学第一定律

公理二:高温向低温传热

公理三:气体流动不与力学定律抵触

气体流动不能与力学定律抵触,这是公理。

目 录

第一章 基本概念	1
第一节 功的概念	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	4
第四节 热力过程过程曲线压容图	5
第五节 温度的定义	7
第二章 热力学第一定律	9
第一节 功、内能、热量	9
第二节 热力学第一定律	10
第三节 过程功	11
第三章 理想气体,熵,热力学第二定律	17
第一节 理想气体	17
第二节 任意气体	21
第三节 熵	21
第四节 热力学第二定律	27
第四章 数学哲理	28
第一节 哲人哲学理念下的数学	28

第二节	热力学第三定律,绝对零度,零的定义	30
第三节	任意气体的熵是态函的直接证明,讲数学的方法 与数学的意义	32
第四节	热效率公式与香烟利用率,烟屁股悖论	36
第五节	尊重提升他人观点及抛弃错误	40
第六节	思想实验也是实验	42
第七节	去除累赘的公理是进步	43
第五章	气体的流动的传统理论与实验	44
第一节	依据过程功 $dw = pdv$,讨论理想气体一维稳定 流动	44
第二节	实验知识,气体流动的缩放喷管	50
第三节	关于水蒸气喷射的两种加热方式的比较	57
第六章	反作用力法,讨论气体流动	61
第一节	水流的反作用力计算	61
第二节	气体流动的反作用力法	64
第七章	数学例题,数学测算及工程	74
第一节	气体通过旋涡的计算	74
第二节	几个数学问题	81
第八章	等温、绝热气柱压强与高度的关系及其他	91
第一节	等温气柱压强随高度分布的三种计算方法	91
第二节	绝热气柱压强与高度关系的两种推导方法	95
第三节	科学思想可以想	98

第四节	从理想气体,到脚踏实地:水蒸气不需冷却全部 变为水的现实方法	98
第五节	热力学教育,要走妙棋	104
后记		106
参考文献		109

第一章 基本概念*

第一节 功的概念

一、概述

1 kg 气体的循环。

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,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,力学知识得以完成,力学已经如同欧几里得几何一样成了科学。

工程热力学定义力:弹簧称可以测量的叫做力;弹簧称不能测量的就不是力。这样定义的力,就是我们在日常生活中,机械工程中所述的力。

物体,如石头、木头,可以承受力。人要碾米推磨,要打水拉绳,还有犁田、推车,从这些工作总结出:克服力的作用,移动一段距离,对我们人类的意义很大。力乘以距离定义为功,这个定义最早阿基米德研究杠杆时就有了。而到了牛顿时代,功又与动能连系起来。

* 注:本书所用字母,以工科的工程热力学教材的习惯用法。考虑到理科习惯及有利于学生思考,也夹杂着理科的习惯用法。书中有时把 $d\omega$ 、 ω 、 w 都当作一个概念,读者对此要加以注意。

工程热力学所说的气体做功,即指“力乘以距离的功”也指气体流动,动能增加的动能,都用 ω 表示。工程热力学,是由热能动力工程发展起的理论。根据实际热机(火力发电热能动力系统,柴油机,汽油机,制冷装置,空调装置)的工作过程,我们总结出:我们只需研究 1 kg 气体(称作工质,也指这 1 kg 气体冷凝成的液体)在热机中的做功过程就可以了。热机连续运转,就是这 1 kg 气体的循环。1 kg 气体在“活塞气缸”形成的容器中做功,研究成理论,用在气体流动时的做功上,在科学上称作类比。

二、活塞气缸中的气体做功

我们只讨论 1 kg 气体。

气体在容器中,就是 1 kg 气体。在活塞气缸构成的容器中如图 1.1 所示。

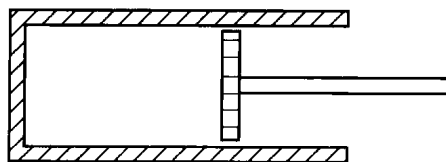


图 1.1 1 kg 气体在气缸中

拉动活塞气体的体积变大,这时气体对外做功。我们规定气体对外做功为正功,此时气体的温度要下降(就是说,气体要从外界吸收热量,才能保证温度不下降)。

推动活塞,气体的体积缩小,这时外界对气体做功。我们规定,此时气体作负功。这时气体温度要升高(就是气体要向外散热,才能保证温度不升高)。

这里需要特别注意:我们只研究活塞气缸构成的容器中的 1 kg 气体。体积缩小作正功,体积增大作负功。气体作正功,就是气

体对外作正功。若图 1.1 的外界压强很大,超过气缸内的压强,需要很大的力来拉活塞杆才让 1 kg 气体膨胀。这时,仍然是 1 kg 气体对外做功。这些是基本概念的正确理解。

今后,我们就研究 1 kg 气体。遇到气体的体积增大,就是气体作正功,是气体对外做功。而气体体积缩小,是气体吸收外界的功,气体作负功。这 1 kg 气体经历过程,完成循环,它与外界的关系,一是交换热量,二是交换功。外界只是热源的温度要关注,而外界的其他性质(如压强,质量,开放性,孤立性……)全不讨论。

三、气体做功的公式

如图 1.2 所示,活塞的面积乘以气体的压强就是力,再乘以活塞移动的距离就是功,有公式

$$\omega = pAL = p\Delta v \quad (1.1)$$

式中 ω ——气体所做的功, J/ kg;

p ——气体的压强, Pa;

A ——活塞面积, m^2 ;

L ——活塞移动的距离, m;

Δv ——气体比体积的变化, m^3/kg 。

由于压力 p 是变化的,公式(1.1)中写成 $\omega = p(v)\Delta v$ 或微分式 $d\omega = pdv$ 。

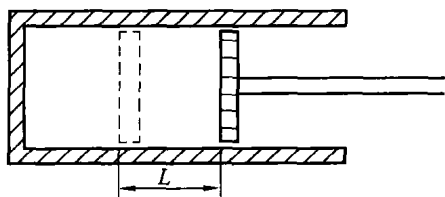


图 1.2 气体做功示意

第二节 平衡态,基本状态参数

研究 1 kg 气体,在活塞气缸构成的容器中。气体在气缸中没有流动(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。平衡态可测出气体各状态参数。平衡态,就是准静态。

(1) 比体积 v ,就是 1 kg 气体的体积,单位为 m^3/kg 。

(2) 压力,在工程热力学中,压强也称作压力,单位为 Pa(帕), N/m^2 。

(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,氦气)的热力学数表定义。这样定义的温度范围低至零点几 K,高至数千 K。

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、比体积是不同的值)是缓慢的过渡的。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,也称平衡态、准平衡状态。

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,都不可倒回去,这是不可逆的过程。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(热,必须经过人类创造的热

机,才能部分转换为功)。

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,热不能再自发地转换为功。

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)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。因为不可能反过来,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;气体没有内摩擦与外摩擦。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。

可逆过程简单的定义就是:传热没有温差,过程没有摩擦。

工程热力学研究热机,是以可逆过程为基础的。在哲学,没有可逆过程,而热机研究存在可逆过程。因为存在着可无限接近于可逆过程的热力过程。如传热温差 10 K, 1 K, 0.1 K, 0.01 K, 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 热力过程过程曲线 压容图

气体在活塞气缸构成的容器中体积增大,按准平衡态过渡。随着体积的变化,压力、温度也变化了,热力过程是指这种变化的特点。

气体(质量为 1 kg)的体积称作“比体积”。比体积 v 、压力 p 和温度 T 是气体状态的参数。

任何气体 v, p, T 三者的关系由隐函数 $f(v, p, T) = 0$ 确定(在

工程热力学范畴内,作如此简化,与实际工程适用)。\$f(v, p, T) = 0\$,称作这种气体的状态方程。空气作为理想气体,状态方程为 \$pv = 287 T\$。

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,温度或压力随比体积变化的关系就确定了。

一元函数的方程式画在坐标图上就是过程曲线。以压力为纵轴,以比体积为横轴的过程曲线,称作 \$p - v\$ 图(压容图)上的过程线。相应的有 \$T - p\$ 图, \$T - v\$ 图等等。

以理想气体的等温过程为例,画出压容图上的过程线图(图 1.3)。

等温过程:1 kg 气体在活塞气缸构成的容器中,慢慢移动活塞,让气体体积变大而让气体的温度保持不变,这是气体吸热过程(若体积变小,则气体放热)。

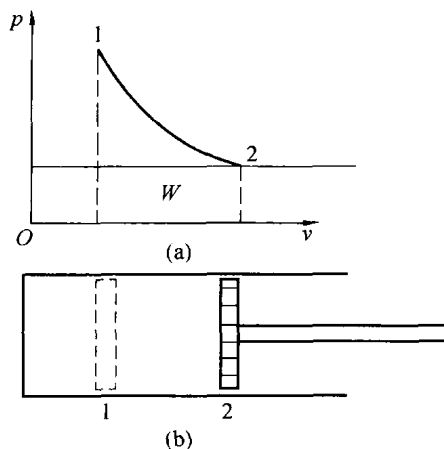


图 1.3 功示意

将 $T = T_1$ 代入状态方程, 得到 $p = 287 T_1 / v$ 这里, T_1 是常数, 它指出了压力与比体积的一元函数关系。

过程功由公式(1.1), 得

$$\omega = \int_{1-2} \Delta \omega = \int_{1-2} p_i \Delta \omega = \int_{1-2} p_i dv = \int_{1-2} \frac{287 T_1}{v} = 287 T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

上式是过程曲线下的面积。等温过程, $T = T_1$, T_1 是常数。在 $T - p$ 图上, 过程曲线是平行于横轴的平行线(图 1.4)。

研究工程热力学, 理想化之后的热力过程, 有等温过程, 还有等压过程, 等体过程, 绝热过程, “多变过程”。如同等温过程, 可以求得状态参数之间的一元函数关系。

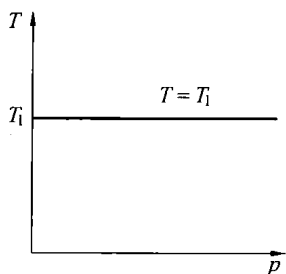


图 1.4 过程曲线: 温度、压力图

第五节 温度的定义

用以下的讲叙, 去理解热学工程师对温度的理解。

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。看气体的状态方程 $f(v, p, T) = 0$, v, p 很容易测量, 那么由 v, p 去决定 T 就定义了温度。温度表可用一个压力表改制而成, 如图 1.5 所示。腔内的容积为 1 m^3 , 装有 1 kg 空气。压力表加一圈温度的刻度。在空气的热力数表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