

研究生用教材



高等空气动力学

GAODENG KONGQI DONGGLIXUE

王振清 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



研究生用

高等空气动力学

主 编 王振清
副主编 盖京波 吕红庆

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书在高速可压流动基础上主要介绍了飞行器部件空气动力学的理论和分析方法。主要内容包括:热力学基础知识,高速一维流动基本关系式和激波、膨胀波基本理论;边界层的基本概念和理论;亚音速翼型及机翼的气动特性,亚音速薄翼型绕流的相似律;超音速流中的翼型绕流特点,薄翼型超音速线性化理论,机翼及绕流流场基本概念,无限翼展斜置翼的超音速气动特性,有限翼薄机翼边界对绕流特性的影响,超音速机翼气动模型的建立;旋成体线性化位流方程及基本解,细长旋成体理论,组合体气动特性分析;高超音速流的基本定义和特征,高超音速流的基本激波关系式和马赫数无关原理,高超音速飞行器气动加热预测和热防护问题。

本书可作为航空宇航学科飞行器设计、航空宇航推进理论与工程等专业的研究生教材,也可以作为相关专业科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高等空气动力学/王振清主编.—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.7

ISBN 978-7-81133-827-0

I. ①高… II. ①王… III. ①空气动力学
IV. ①V211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 131879 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 17.75
字 数 376 千字
版 次 2010 年 7 月第 1 版
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书是在哈尔滨工程大学“十一·五”规划研究生教材出版基金的资助下完成的。

高等空气动力学是飞行器设计及航空宇航等航空航天专业的重要基础课程,哈尔滨工程大学航天工程系于 1978 年开始招收导弹结构设计和导弹控制专业的本科生,并为相关专业开设空气动力学课程,在空气动力学方面积累了较为深厚的教学经验。2004 年开始招收飞行器设计学科硕士研究生,早在新生入学之前有关高等空气动力学适用教材的选录工作就在紧锣密鼓的进行,虽然有关空气动力学的书籍很多,但适合研究生阶段空气动力学教学的书籍却很少,原因是知识点分散,不能提供系统完整、明晰简要的高等空气动力学基础知识,无法满足研究生教学内容的要求。因此,急需一本能够系统深入地阐述高等空气动力学相关知识的教材,以满足飞行器设计专业及航空宇航等专业基础课程教学的需要。在国内无相应教材可选的情况下,航天工程系的空气动力学教学工作者于 2003 年就开始了高等空气动力学一书的筹备编写工作,以满足自身教学需要。2004 年 9 月新生入学,教材初稿基本完成并应用于教学。实践中发现,当时的初稿虽然能满足一时的教学需要,但却不能很好地满足学生自身知识体系水平的要求,学生对基础空气动力学知识掌握的深度与广度直接决定着他们对高等空气动力学知识的学习与理解,因此高等空气动力学教材内容不能完全独立于基础空气动力学之外,教材中不但要有基础空气动力学知识的补充和过渡,而且要根据学生实际对初稿中各部分内容所占比例及难易程度不断进行调整和补充。2004 年以来,经过多年的教学实践检验,该书内容不断得到完善,各理论知识分布比例及难易程度均由教学实践中学生的实际情况决定,可以说本书最终内容的确定是以教学实践要求为指导,筛选汇编了适合研究生教育需要的经典空气动力学的基础理论知识,符合本阶段学生知识能力水平和学习的需要。

本书的主要目的是为研究生进行飞行器空气动力分析打下坚实的理论基础,主要阐述高等空气动力学的基础知识和基本理论。在论述中涉及的速度范围从亚音速、超音速到高超音速;流体的流动状态从无黏流、黏性层流到湍流以及漩涡分离流;外流绕流包括翼型、机翼和机身翼身组合体等。作为研究生教材,本书力图通过全书严格完整的数学推理使学生掌握高等空气动力学的基础知识,培养学生严谨的科学研究能力。为了满足培养复合型人才的需求,加强了学科之间的交叉性,拓宽了学生的视野。全书为读者提供了较为完整的高等空气动力学的基础知识。可作为航空航天院校的飞行器设计学科学位课教材以及航空宇航推进理论与工程、导航、制导与控制、兵器、船舶等相关专业的研究生选修课教材,也可供有关专业的教师、科研人员和工程技术人员参考。

本书的编写分工为:王振清编写绪论及第3,4章;盖京波编写第1,2章;吕红庆编写第5,6章;全书经共同讨论、修改,最后由王振清教授统一定稿。

本书的编写主要以国内外现有空气动力学文献资料为参考,吸收汇编了杨岙生、陈再新、钱翼稷、徐华舫、黄志澄等优秀专家学者的相关专著内容,在本书成文之时,作者对上述历年来从事空气动力学研究的老一辈专家学者们表示特别感谢,他们丰富的科研成果构成了本书的基础。在本书的编写过程中,哈尔滨工程大学研究生院曾组织专家审查,对本书的编写提出了许多宝贵意见。本书的出版得到了哈尔滨工程大学出版社的大力支持。在本书出版之际,对哈尔滨工程大学研究生院和哈尔滨工程大学出版社表示衷心感谢。当然,本书的正式刊印和出版还有许多编辑和审校专家的努力,在此一并致谢。

由于作者学术水平和能力有限,书中肯定有错误或不足之处,热忱欢迎专家和读者批评指正。

编 者

2010年2月

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 空气动力学的基本任务及分类	1
0.2 空气动力学的研究方法	3
0.3 飞行器部件拆分基本思想	3
0.4 本书的主要研究内容	4
第 1 章 高速可压流动基础	6
1.1 热力学基础知识	6
1.2 声速和马赫数	12
1.3 高速一维定常流	15
1.4 膨胀波	24
1.5 正激波	33
1.6 斜激波	43
1.7 激波 - 膨胀波理论在超声速翼型上的应用	50
习题	53
第 2 章 边界层流动	54
2.1 边界层概念和基本特征	54
2.2 平面不可压层流边界层微分方程	56
2.3 平板边界层的 Blasius 解	59
2.4 卡门动量积分关系式	64
2.5 平面紊流边界层	70
2.6 平板混合边界层	72
2.7 边界层的分离与控制	73
习题	79
第 3 章 亚跨声速翼型和机翼的气动特性	80
3.1 线性化速度势方程	80
3.2 亚声速气流绕薄翼型流动的相似律	87
3.3 机翼的跨声速气动特性	92
习题	108

第4章 超音速流中的翼型与机翼	110
4.1 超音速流中翼型特点及基本理论	110
4.2 薄机翼超音速绕流特性分析	123
4.3 超音速机翼气动模型	131
习题	142
第5章 机(弹)体气动特性及翼身组合体气动特性	145
5.1 类圆截面机(弹)体气动特性	145
5.2 翼身组合体气动特性	171
习题	202
第6章 高超音速空气动力学基础	205
6.1 高超音速流的定义及研究内容	205
6.2 高超音速边界层问题	208
6.3 高超音速流的基本激波关系式及马赫数无关原理	215
6.4 高超音速气动工程预测	219
6.5 高超音速飞行器气动加热及热防护基础	224
习题	239
附录	240
附表1 亚声速流动($\gamma = 1.4$)的流动参数与 Ma 数的关系	240
附表2 超声速流动($\gamma = 1.4$)的流动参数与 Ma 数的关系	244
附表3 气体动力学函数表($\gamma = 1.4$, 以 λ 为自变量)	255
附表4 激波流动的参数($\gamma = 1.4$)	264
附表5 零迎角平板边界层的函数 $f(\eta)$ 及其导数	272
习题答案	274
参考文献	277

第 0 章 绪 论

0.1 空气动力学的基本任务及分类

1738 年伯努利出版他的专著时,首先采用了水动力学这个名词并作为书名;1880 年前后出现了空气动力学这个名词;1935 年以后,人们概括了这两方面的知识,建立了统一的体系,称为流体力学。流体力学是研究流体(包括气体、液体)运动规律及传热、传质规律的学科。主要研究在各种力的作用下,流体本身状态以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动形态之间的相互作用。它的主要基础是牛顿运动定律和质量守恒定律,常常还要用到热力学知识,有时还用到宏观电动力学的基本定律,本构方程和物理学、化学的基础知识。流体力学的基础理论由三部分组成:

- (1)流体静力学 研究流体处于平衡静止状态时各种作用在流体上的力的规律的学科;
- (2)流体动力学 研究流体处于运动状态时各种作用在流体上的力的规律及流体运动规律的学科;
- (3)气体动力学 研究气体处于高速流动状态时气体运动规律的理论。

空气是流体的一种,空气动力学是流体力学的一个分支,来源于流体动力学(研究与流体有相对运动的物体(飞行器)受力规律的学科),如果流体介质是空气,则称为空气动力学。空气动力学是研究物体与空气之间有相对运动(物体在空气中运动或物体不动空气绕流过物体运动)时空气在物体扰动作用下的运动规律及空气与物体之间作用力的科学。

通常所说的空气动力学其研究内容是飞机、导弹等飞行器在各种飞行条件下流场中气体的速度、压力、温度和密度等参量的变化规律,飞行器所受的升力和阻力等空气动力及其变化规律,气体介质或气体与飞行器之间所发生的物理化学变化以及传热传质规律等。空气相对于物体的运动,可以在物体的外部进行,像空气流过飞机表面;也可以在物体的内部进行,像空气在风洞内部和进气道内部等的流动。在这些外部和内部流动中,尽管空气的具体运动和研究的目的是有所不同,但它们都发生了一些共同的流动现象,遵循一些共同的流动规律,例如质量守恒、牛顿定律、能量守恒、热力学定律等。空气的运动规律主要是依据物理学的基本原理推导出空气的各种参数,例如速度、压强、密度、温度等各参数之间的关系。例如从质量守恒方程可以推导出气体的速度方程;由牛顿第二定律可以推导出欧拉运动方程;从能量守恒定律可以推导出能量方程、伯努利方程等。

空气动力学研究的基本任务,不仅要认识空气与物体之间相对流动所发生现象的基本实质,找出其在空气动力学中的表述,而且要研究如何应用这些规律解决工程实际问题:一方面是在确定新飞行器所要求的性能后,寻找满足要求的外形和气动措施;另一方面是在确定飞行器外形和其他条件后,预测飞行器的气动特性,为飞行器性能计算和结构、控制系统的设计提供依据,并对空气动力学领域的新情况、新进展加以预测。20 世纪以来,飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,都是与空气动力学的发展分不开的。

空气动力学可以根据不同的方法进行分类,常见的分类方法如下。

首先,根据流体运动的速度范围或飞行器的飞行速度分类。空气动力学是流体力学的一个分支。气体流动在不同的速度范围呈现不同的特点。飞行器的飞行马赫数大于 0.3 时,就必须考虑空气的压缩性。当飞行速度接近音速时,在飞行器的绕流中会出现局部的超音速区,在其后会形成激波,使迎面阻力剧增。当飞行速度超过音速几倍时,由于高速气流的温度升高,气体内部发生种种物理化学变化,这时必须同时考虑气体的热力现象和动力现象,研究这些现象的学科就是空气动力学的一个分支——气动热力学。根据不同的马赫数(Ma),可将空气动力学分成亚音速空气动力学(马赫数约小于 0.8)、跨音速空气动力学(马赫数在 0.8~1.2 之间)、超音速空气动力学(马赫数在 1.2~5.0 之间)和高超音速空气动力学(马赫数大于 5.0)。

其次,当雷诺数 Re 足够大时,仅在速度梯度和温度梯度较大的区域,如边界层和尾迹内,气体的黏性对流动才有明显的影响。根据黏性是否可以忽略,空气动力学可分为无黏性(理想)空气动力学和黏性空气动力学。黏性空气动力学中最重要的是边界层理论。

除了上述分类以外,空气动力学中还有一些边缘性的分支学科,例如稀薄气体动力学、高温气体动力学等。

在低速空气动力学中,介质密度变化很小,可视为常数,使用的基本理论是无黏二维和三维的位势流、翼型理论、升力线理论、升力面理论和低速边界层理论等;对于亚音速流动,无黏位势流动服从非线性椭圆型偏微分方程,研究这类流动的主要理论和近似方法有小扰动线性化方法,普朗特-格劳尔特法则、卡门-钱学森公式和速度图法,在黏性流动方面有可压缩边界层理论;对于超音速流动,无黏流动所服从的方程是非线性双曲型偏微分方程。

在超音速流动中,基本的研究内容是压缩波、膨胀波、激波、普朗特-迈耶尔流动、锥型流,等等。主要的理论处理方法有超音速小扰动理论、特征线法和高速边界层理论等。跨音速无黏流动可分外流和内流两大部分,流动变化复杂,流动的控制方程为非线性混合型偏微分方程,从理论上求解困难较大。

高超音速流动的主要特点是高马赫数和大能量,在高超音速流动中,真实气体效应和激波与边界层相互干扰问题变得比较重要。高超音速流动分无黏流动和黏性流动两个方面。

工业空气动力学主要研究在大气边界层中,风与各种结构物和人类活动间的相互作用,以及大气边界层内风的特性、风对建筑物的作用、风引起的质量迁移、风对运输车辆的作用和风能利用,以

及低层大气的流动特性和各种颗粒物在大气中的扩散规律,特别是湍流扩散的规律,等等。

0.2 空气动力学的研究方法

空气动力学的研究方法和物理学的各个分支的研究方法一样,主要有理论分析、实验研究和数值模拟三种方法。

空气动力学的理论研究通常用一种严格的数学方法,在一组规定的具体边界条件或初始条件下求解气流所遵循的微分方程。理论研究往往根据实际问题的主要因素,作出某些假设,简化计算模型。理论分析结果能揭示流动的内在规律,具有普遍适用性,但分析范围有限。

实验研究主要是应用风洞。各种测试仪表对相应飞行器的模型的气动参数进行实验测定或者进行实物飞行实验取得的结果。现代化的测试一般都是自动化的,配有专用电子计算机,实验一旦做完,数据就整理出来(数值计算示意图如图 0-1 所示),曲线也就画出来了。实验研究能够反映实际流动规律,发现新现象,检验理论结果,但结果的普适性较差。

近年来,随着计算机的发展,计算空气动力学逐渐发展起来,一架具体的飞机外形是很复杂的,要想求得解析解是不可能的。现在用电子计算机数值计算能把流动情况和作用在飞机上的各种空气动力学数据计算出来(数值计算示意图如图 0-1 所示)。在计算空气动力学领域,大型工程软件成为研究工程流动的有力武器。数值方法的优点是能计算理论分析方法无法求解的数学方程,比实验方法省时省钱,但毕竟是一种近似解方法,适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能所限制。

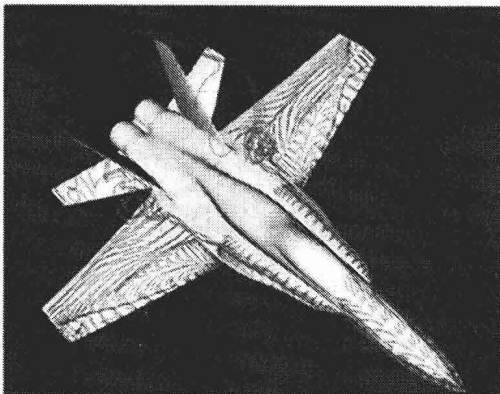


图 0-1 数值计算示意图

三种方法各有优缺点,学习空气动力学时应该注意理论与实践结合,理论分析、实验测量与数值计算并重。

0.3 飞行器部件拆分基本思想

在研究飞行器空气动力特性时,往往首先研究飞行器各单独气动部件(如弹(机)翼、弹(机)体和尾(机)翼等)的空气动力特性,在其基础上再进行翼-身组合体的气动特性研究,该方法称为部件组拆法,就是将飞行器的气动部件单独拆分出来,研究这些部件在孤立状态下的

气动载荷和气动特性,然后进行组合得到飞行器总的气动力,组合过程不是简单的叠加求和,要考虑到各气动部件之间的干扰影响,在干扰量中,弹(机)体、弹(机)翼间的干扰用干扰因子方法计算,弹(机)翼尾翼间的干扰用线性化理论及细长体理论计算。

以常见的弹体-弹翼-尾翼布局外形的法向力为例来简单介绍部件组拆法的基本思想。首先,通过对弹(机)体、弹(机)翼和尾(机)翼的气动特性分析得到了其各自的法向力系数 C_{N_B} , C_{N_W} , C_{N_T} ; 然后,考虑干扰作用,得到飞行器总的法向力系数表达式为

$$C_{N_{BWR}} = K_{B(W)} C_{N_B} + K_{W(B)} C_{N_W} + K_{T(BW)} C_{N_T}$$

式中, $K_{B(W)}$ 为弹(机)翼对弹(机)体干扰因子; $K_{W(B)}$ 为弹(机)体对弹(机)翼干扰因子; $K_{T(BW)}$ 为弹(机)体和弹(机)翼对尾翼的干扰因子。通过引入干扰因子,分别对单独弹(机)体、单独弹(机)翼和单独尾翼的法向力进行了修正,进而得到了组合体的法向气动系数。因此,采用部件拆组法时,需要研究各单独部件之间的气动干扰,确定各部件间的干扰因子。

部件拆组法主要研究的内容是弹(机)体气动特性、弹(机)翼气动特性以及翼身组合时的干扰因子这三类问题。原则上,确定部件拆组法中弹(机)体、弹(机)翼的气动力可以采用实验观测和计算模拟手段得到,但是实际应用中一般采用部件空气动力学理论给出,因此部件空气动力学理论是本书的重点内容。飞行器部件空气动力学从流动基本方程出发,在物理现象指导下进行合理的物理模型假设,在此基础上对经典的流体动力学数学模型进行简化,进而建立具有工程实际应用价值的气动力近似理论。

0.4 本书的主要研究内容

本书立足于飞行器部件拆分的基本思想,主要介绍了飞行器部件空气动力学的理论和分析方法。在介绍高速可压流动相关理论的基础上,引入小扰动线性化理论、细长旋成体理论等近似理论方法对飞行器的翼、身等重要气动部件的空气动力特性求解问题进行了研究,在此基础上,考虑干扰效应,分析了翼-身等组合体的气动特性问题。最后,本书面对未来人类航空航天事业向高超音速时代迈进的现实,简要介绍了高超音速飞行器领域的相关理论,为学生提供初等的高超音速空气动力学知识储备。

本书第一部分介绍了可压缩流动基础。主要内容包括热力学基础知识、高速一维定常流能量方程、膨胀波、激波等相关内容,构成了整个高等空气动力学的基础内容。

第二部分介绍了黏性流体力学与边界层理论。主要内容包括边界层的基本概念和理论,边界层的分离与控制等内容,是飞行器的各种增升减阻设计的理论基础。

第三部分内容为可压缩空气动力学。内容包括亚声速翼型和机翼的气动特性,亚声速小扰动理论的线化理论,薄翼型机翼的气动特性。

在第四部分详尽介绍了超音速和跨音速翼的气动特性。

第五部分内容根据飞行器形状特征,重点阐述了旋成体气动特性理论。

作为高等空气动力学的补充,本书在第六部分介绍了高超声速空气动力学的相关知识,实现高超声速飞行是当前飞行器研究与发展的重点方向,本章紧跟该方向前沿,为读者提供必要的理论基础。内容包括高超音速流的基本定义和特征,高超音速流的基本激波关系式和马赫数无关原理,高超音速边界层方程及相似解,以及高超音速飞行器气动加热预测和热防护问题。

第 1 章 高速可压流动基础

气体是一种可压缩流体。但当气体作低速运动时,由于气体压强变化较小,引起密度的变化也很小,通常可以忽略气体的压缩性,把低速气体流动当作不可压缩流处理。然而,当气体作高速运动时,气体的压强和密度有显著变化,则必须按可压缩流来处理。因此,考虑气流的可压缩效应,是高速空气动力学的重要特征。

1.1 热力学基础知识

在可压缩流动过程中,总是伴随热力过程的发生。例如气体在收缩喷管内的流动,气体压强下降,速度增大(动能增大),温度降低(热焓减小),密度减小,在忽略黏性及与外界无热交换的条件下,可作为等熵流过程处理。因此,研究可压缩流动是以动力学及热力学两方面的一些基本物理定律为理论基础的。正因为如此,热力学知识是可压缩流动研究中必不可少的。本章将简要回顾一下可压缩流动理论中的一些必要的热力学基本知识。

1.1.1 功、热量和内能

用热力学方法研究问题时,首先要确定研究的对象,将所研究的一部分物质或空间,从其余的物质或空间中划分出来,这种划定的研究对象叫体系或系统(system)。与系统通过物理界面(或假想的界面)相隔开并与系统密切相关的周围部分,则称为环境。热力学系统可以是客观存在的物体,如大量分子、原子、离子等物质微粒组成的宏观集合体,也可以是只有数学界面的隔离体。系统与环境之间一般存在相互作用,例如传热、传质或做功。

根据体系与环境的关系,体系分为以下三种。

(1) 隔绝体系(isolated system) 体系与环境之间既无能量交换,又无物质交换的体系。体系完全不受环境的影响,其中能量包括:热、功、其他能量。

(2) 封闭体系(closed system) 体系与环境之间只有能量交换,没有物质交换。

(3) 开放体系(open system) 体系与环境之间既有能量交换,又有物质交换。

高速流大多数情况属隔绝系统和封闭系统。

体系的状态是由许多宏观热力学变量(物理量),如温度、压力等,来描述和规定的。当系统的一系列物理量,如压强 p 、体积 V 、温度 T 、密度 ρ 、内能 u 等确定后,我们就说体系处于一

定的状态,表征这种状态的物理量叫状态函数。有一个状态函数发生变化,体系的状态就发生改变。体系的状态函数有很多,但并不都是独立变量。对一定量单相纯物质的封闭体系,只需两个状态函数就能确定体系状态,多采用温度 T 、密度 ρ 为独立变量,而把状态量就表示为温度 T 、密度 ρ 的函数,即

$$p = p(\rho, T), u = u(\rho, T)$$

热和功是体系状态变化时,与环境交换能量的两种不同形式。

当体系状态变化时,由于体系和环境温度不同而使体系与环境间传递的能量称为热。如相变热、溶解热、化学反应热等。热运动是一种无序运动,所以热量是体系和环境的内部质点因无序运动的平均强度不同而交换的能量,而不是指物体冷热的“热”。从气体分子运动论的观点看,温度反映了物体内部质点热运动的平均强度。热量是由系统及其外界间存在的温度差引起的穿越系统边界的能量传递。系统并非具有热量,而是具有能量,热量是传递中的能量。习惯上,热量传入系统则热量为正,如果热量传出系统则热量为负。

功常被定义为力与在力的方向上移动距离的乘积。这是功的机械定义。功的更加通用的定义是热力学定义:功是系统及其外界间相互作用的一种形式。如果对外界的唯一外在影响是能提升重物,则系统对外界作了功。功的大小等于重物所受重力与提升距离的乘积。如果系统向外界环境作功,功为正。活塞压缩流体作的是负功,反之,流体膨胀推动活塞作正功。

作功和传热是能量传递的两种方式,因此功与热量都是系统与外界所传递的能量,而不是系统本身的能量,其值并不由系统的状态确定,而是与传递时所经历的具体过程有关。所以,功和热量不是系统的状态参数,而是与过程特征有关的过程量。热与功的相互转换是通过物质系统来完成的,不可能直接转换,例如,热转换为功是系统吸热后内能增加,再由系统内能的减少而对外作功。热量和功在数量上是等值的,并具有相同的单位。

热力学能是系统内部所有微观粒子全部能量的总和,又叫内能,以 U 表示。气体的内能包括分子微观热运动(取决于温度)所包含的动能(分子平移、转动和振动的内部动能),以及由于分子间存在作用力而形成分子相互作用的内部位能。对于完全气体,分子间无作用力,因此单位质量气体所具有的内能 u 仅是温度的函数,即

$$u = u(T) \quad (1-1)$$

既然内能只取决于温度,所以它是一个与变化过程无关的状态函数。

1.1.2 热力学第一定律

当流动是可压缩时,不能仅以机械能守恒来代表总能量守恒,也不可能再由动量定理推出能量关系式。必须由经验观察总结出的另一个物理准则——热力学第一定律,用来描述可压缩流动问题。热力学第一定律涉及的物理量——内能,便参与到了能量守恒的表达式中。由于热力学第一定律除涉及机械能做功之外,还包含了其他形式的能量转换,因此,热力学第一定律涵盖了更大范围的能量守恒原理。在空气动力学和气体动力学中,所关心的能量形式是

热能和机械能。

1. 热力学第一定律的表达式

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热力学中的应用,它确定了热力过程中各种能量在数量上的相互关系。热力学第一定律指出外界传给一个封闭物质系统(无物质交换,有能量交换)的热量 δQ 等于系统内能增量 dU 和系统对外界所做的机械功的总和,即

$$\delta Q = dU + p dV \quad (1-2)$$

式中, dV 是系统的体积变化量; p 是系统的压强。这就是静止系统的热力学第一定律。要注意 Q 不是状态函数,不能用微分符号表示。

将上式用质量除,得单位质量的系统的能量守恒方程

$$\delta q = du + p d\left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (1-3)$$

式中,用小写字母 q, u 表示单位质量的物理量。

根据热力学第一定律,为了获得机械能,则必须花费热能或其他形式的能量,第一类永动机是不可能实现的。

总结:内能是体系内部储存的能量,它是体系的状态函数,其绝对值尚无法确定,它是与微观粒子运动相联系的能量,在一定条件下,内能可以与其他形式的能量(热和功)相互转化,在转化中总能量总是守恒的,但内能未必守恒。

如果气体从状态 1 变化到状态 2 的过程中是等压过程,且只有体积做功,则热力学第一定律可表示为

$$Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = (U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1) \quad (1-4)$$

式中, Q_p 表示等压变化过程吸收的热量。由于 U, p, V 都是体系的状态函数,那么它们的组合 $(U + pV)$ 也一定具有状态函数的性质,把体系的 $(U + pV)$ 定义成一个新的状态函数叫焓,用符号 H 表示,也称为热焓,即

$$H = (U + pV) \quad (1-5)$$

由于 U 的绝对值不能确定,所以 H 的绝对值也不能确定, H 是状态函数,具有能量的量纲,但没有确切的物理意义。一定质量的物质按定压可逆过程由一种状态变为另一种状态,焓的增量便等于在此过程中吸入的热量。

单位质量物质的焓称为比焓,表示为

$$h = u + \frac{p}{\rho} \quad (1-6)$$

式中, p/ρ 代表单位质量气体的压力能, h 表示气体的内能和压力能的总和。它的微分形式为

$$dh = du + p d\left(\frac{1}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho} dp \quad (1-7)$$

式(1-3)是对于静止体系的能量守恒方程。对于流动系统的能量守恒方程为

$$\delta q = du + p d\left(\frac{1}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho} dp + v dv \quad (1-8)$$

该式比静止物系的能量守恒多了两项, dp/ρ 是流体微团的体积不变, 压强有变化的流场中流体所做的功; $v dv$ 是动能的改变量。将式(1-7)代入式(1-8)中, 流动物系能量守恒式为

$$\delta q = dh + v dv \quad (1-9)$$

式中, δq 是外热, 具体来源可以是传导进来的热, 也可以是燃烧产生的热。 $\delta q = 0$ 称为绝热过程。

2. 热力学过程、完全气体的比热和比热比

(1) 等容过程

气体在等容变化过程中, 体积不变, $1/\rho = \text{常数}$, $d(1/\rho) = 0$, 外部吸收的热量全部用来增加气体的内能, 因此

$$\delta q = du = c_v dT \quad (1-10)$$

式中, c_v 称为定容比热容, 是单位质量气体在等容过程中每升高 1 摄氏度所需要的热量, 单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 一般取 $c_v = 717.6 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

$$c_v = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \quad (1-11)$$

由式(1-10), 并取 $T=0$ 时, $u=0$, 则

$$u = \int_0^T c_v dT = c_v T \quad (1-12)$$

或

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad (1-13)$$

(2) 等压过程

气体在等压变化时, $p = \text{常数}$, $dp = 0$, 由式(1-3)和式(1-7)得

$$\delta q = du + p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = dh \quad (1-14)$$

令

$$c_p = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \quad (1-15)$$

c_p 称为定压比热比, 是单位质量气体在等压过程中温度每升高 1 摄氏度所需加的热量, 在空气动力学中近似取 $c_p = 1004.7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。取 $T=0$ 时, $h=0$ 则

$$dh = c_p dT \quad (1-16)$$

在等容过程中, 体系不做体积功。当温度升高时, 它从环境所吸收的热全部用来增加内能。在等压过程中, 升高温度时, 体系除增加内能外, 还要多吸收一部分热量以对外做膨胀功。所以 c_p, c_v 在数值上是不等的, 对气体来说 c_p 恒大于 c_v , 其差值为

$$(c_p - c_v) dT = p d\left(\frac{1}{\rho}\right)$$

根据理想气体的状态方程 $p = \rho RT$, 得

$$p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = R dT \quad (1-17)$$

因此

$$c_p - c_v = R \quad (1-18)$$

式中, R 为理想气体常数。

如果引入比热比 $\gamma = c_p / c_v$, 对完全气体 $\gamma = 1.4$, 则

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R \quad c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R \quad (1-19)$$

此时, h 可以写为

$$h = c_p T = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} \quad (1-20)$$

(3) 绝热过程

$\delta q = 0$, 则热力学第一定律为

$$du + p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = 0$$

根据状态方程 $p = \rho RT$, 令 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ 整理得

$$\gamma \frac{d\left(\frac{1}{\rho}\right)}{\left(\frac{1}{\rho}\right)} = - \frac{dp}{p}$$

上式积分, 得

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = C \quad (1-21)$$

式中, γ 为绝热指数; C 为常数。

1.1.3 热力学第二定律: 熵(entropy)

我们可以观察到大量的不可逆过程: 放在空气中的一杯开水把热量传到空气中, 最后水温与空气温度一样; 但在自然状态下, 热量绝不会从空气中传到与空气热量相同(或更高)的水中, 使水温升高以至变成开水。描述不可逆现象或过程自发进行的方向性的规律就是热力学第二定律, 热力学第二定律最常见的经典表述有以下两种。

克劳修斯表述: 不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化, 即热量不会自动地从低温物体传到高温物体。