

传热学与流体力学基础

王 经 编著

上海交通大学出版社

TK124/51

2007

传热学与流体力学基础

王 经 编 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本教材结合机械工程专业的培养目标,重点讲解热传递过程及其与之相关的热流体流动过程的理论基础。教材内容上注重培养和训练学生的分析计算能力,在学生已经具备的数学、物理、力学知识的基础上,教会他们正确解决在机械制造工程中,所遇到的流体流动与传热问题。同时,通过该课程学习,可使学生在进一步学习有关专业课程时,得以开阔视野,吸收新理论,进行新工艺新材料新技术的创新研究。本教材在国内独具特色,是将传热学与流体力学基础理论相结合的、与动力工程专业教材有较大区别的首批高校专业基础课教材。

本教材强调传热学基础理论和流体力学基本概念,重点对机械工程中最常见的导热问题和热流体问题进行多角度讨论。教材共分七章,并配以思考题、习题。书末附以参考文献与必要的附录图表。全书采用国家法定计量单位和名词术语。

本书适合大学机械制造与机械工程类学生学习选用,也可供从事机械工程专业的科学技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学与流体力学基础/王经编著. —上海:上海交通大学出版社,2007

ISBN 978-7-313-04788-5

I. 传… II. 王… III. ① 传热学-高等学校-教材 ② 流体力学-高等学校-教材 IV. TK124 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 069666 号

传热学与流体力学基础

王 经 编 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

立信会计出版社常熟市印刷联营厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13 字数: 313 千字

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1~3 050

ISBN 978-7-313-04788-5/O·203 定价: 25.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

本教材面向机械工程专业的大学本科学生和机械工程领域的专业技术人员。旨在使学生在已经具备的大学数学、物理、力学知识的基础上,掌握流体流动与传热问题的基础知识,并能在所学理论的基础上,进一步结合工程实际,学会正确处理和解决机械制造工程中所遇到的流体流动与传热问题。

21 世纪的机械工程专业培养的人才,不仅需要掌握现代计算机技术与应用网络技能,还必须掌握所从事专业的基础知识。随着机械工程专业的快速发展,无论是在新材料研制、冷加工、热加工领域,还是在先进制造技术、微细精密加工制造、自动化控制技术领域,流动与传热问题的正确解决,都成为至关重要的技术关键。实际上,在机械工程各专业的科学研究、加工制造和工艺、设备运行及生产安全等领域都不可避免涉及热量传递和流体流动的有关科学问题。随着现代科学技术的发展,从航天飞行器的制造运行到微电子器件的加工工艺,在机械工程涉及的每一个领域,人们比以往任何时候都更加关注机械加工和运行过程中的安全与效率,而这些都与热量传递和流体流动密切相关。《传热学与流体力学基础》这门课程就是按照上述实际需要开设的。多年来,我国高校机械工程类专业急需一本能满足《传热学与流体力学基础》教学的教材。但由于种种原因,至今尚未见到这类教材。为了使《传热学与流体力学基础》教材适用范围扩大到全部机械工程类专业,编者在多年来从事传热学、流体力学课程教学的基础上,按照国家教育部教学要求,参考上海交通大学机械与动力工程学院与美国密歇根大学联合办学的该课程类似教材,以及国内外同类教材的优秀内容,自立系统编写此书。

《传热学与流体力学基础》课程属于技术基础课。它是学生学习专业课程的重要基础。本教材正是基于上述认识,在使用前人教材的基础上,对本课程内容进行了较大变动。首先,将流体力学的基础理论知识编入教材,并根据学生认知规律增加了工程应用内容。在传热学理论部分,结合编者 30 余年的传热学教学经验,以导热、对流、热辐射三种热量传递形式为主线,分别对它们的传递规律、计算方法进行讲解,使学生建立明确的概念。最后结合工程实际,教会学生进行复合换热方面的计算。根据实际需要,对数值计算只在有关章节作简单介绍。囿于篇幅限制和教材本身要求,更具体的内容需要学生进入研究生阶段深造时在专业课中学习。

流体力学基础的主要内容是按照教学要求,重点讲授流体基本物理性质、输运性质、流体的平衡特性与涉及热量传递时的流体动力学基础知识,特别是与对流换热微分方程组建立有关的流体力学基础。本书共分七章。第 1 章为绪论;第 2、3 章为流体力学理论基础;第 4 章为导热的理论和计算(稳态、非稳态);第 5 章为对流换热理论和计算(对流换热微分方程组、无量纲准则的建立、自然对流换热、强迫对流换热的计算);第 6 章为辐射换热的理论和计算;第 7 章为传热过程和复合换热。在教材结构上,编者结合教学体会和课程特点,参照国外教材,进行了一些革新。将流体力学基础知识和热量传递的三种基本方式的基本定律和计算分独立章节集中讲解。

本教材反映了编者多年来从事工程热物理、多相流科学教学、科研实践的心得总结。自然科学的建立是以人类的实践活动为基础的,无论多么深奥的理论,追本溯源,一定来自实践。

本课程所涉及的流体力学与传热学都属于实验科学。而流体力学一直是机械动力工程专业公认的较难对付的课程,究其原因流体运动的数学模型的建立和解析求解非常困难。仅对单相流体,至今 Navier-Stokes 方程的解法仍然没有获得突破。如果是多相流体再与传热问题耦合,其难度更大。近年来由于计算机技术与数据采集技术、数据处理方法的发展,流体力学包括多相流科学更加重视实验研究结果,并在此基础上提高数值计算的水平。有鉴于此,编者认为学好本课程的关键在于学生必须具有良好的高等数学与物理基础,在掌握好基本规律和基本方程的同时,要注重实验技能的训练。只有通过扎实正确的计算和实验,所获结果才对解决实际问题有用。

21 世纪的大学生具有开拓创新的精神和充分发展的广阔天地。《传热学与流体力学基础》课程对于机械工程专业的学生虽然只是大学专业教育的很小一部分,但无论他们今后在哪个工作岗位上,都离不开对热量传递与流体流动问题的解决。我们的教育方针是要学生学有所得,学有所用。本教材每章后都附有一定数量的习题或思考题,以备学生练习,培养分析问题、解决问题的能力。书后的附录及相关资料,可供学生和读者参考使用。

感谢上海交通大学教材编写委员会对本教材出版发行的支持,感谢机械与动力工程学院教务办苏永康老师对本教材的编写所给予的支持;特别感谢上海交通大学出版社及潘新编辑的辛勤劳动;作为编者的教学助教,博士研究生张华,直接参与了本教材第 4、5、6 章的编写、作图等工作,并为全书统一公式、符号等付出了大量辛勤的劳动;硕士研究生姚彦贵、唐琦琳、赵桂生都为教材计算机输入做了大量工作,在此一并表示感谢。编者才疏学浅,书中谬误不足之处在所难免,恳请使用本书的师生和读者批评指正。

王 经

2006 年于徐汇工程馆求是室

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 《传热学与流体力学基础》课程的研究对象及在机械工程领域的应用	1
1.2 《传热学与流体力学基础》的理论基础知识简介	2
1.2.1 传热学的研究对象和方法	2
1.2.2 流体力学基本概念及简介	5
1.3 传热学和流体力学研究方法与单位制	9
习题	11
第 2 章 流体的输运性质和数学描述方法	12
2.1 流体的输运性质	12
2.1.1 动量输运——黏滞现象	12
2.1.2 热能输运——热传导现象(略)	15
2.1.3 质量输运——扩散现象	15
2.1.4 表面张力和毛细现象	16
2.2 流体运动物理量的描述	19
2.2.1 拉格朗日坐标与欧拉坐标	19
2.2.2 拉格朗日描述、欧拉描述与随体导数	19
2.2.3 描述流体运动的几个概念	23
习题	26
第 3 章 流体力学理论基础	28
3.1 流体的平衡——流体静力学基础	28
3.1.1 平衡状态下流体中的应力特征	28
3.1.2 流体的平衡微分方程式	29
3.1.3 流体静力学基本方程	31
3.1.4 压力的表示及测量仪表	32
3.1.5 流体相对平衡时的力学分析	35
3.1.6 作用在物体表面的液体总压力	38
3.2 理想流体运动的基本方程——流体动力学基础	43
3.2.1 理想流体运动的分类	43
3.2.2 流体运动分析	44
3.2.3 连续性方程	47
3.2.4 理想流体的伯努利方程	51

3.2.5 动量方程和动量矩方程.....	57
习题	60
第4章 导热的理论基础及计算	64
4.1 导热理论基础.....	64
4.1.1 导热基本定律.....	64
4.1.2 导热微分方程式(Heat Diffusion Equation)	71
4.1.3 导热过程的初始条件与边界条件.....	74
4.1.4 热扩散率(导温系数).....	75
4.2 导热问题的计算.....	75
4.2.1 稳态导热.....	76
4.2.2 非稳态导热.....	92
习题.....	111
第5章 对流换热的理论基础及计算.....	115
5.1 对流换热	115
5.1.1 对流换热基本概念	115
5.1.2 对流换热问题的数学描述	117
5.1.3 对流换热边界层微分方程组	119
5.1.4 相似原理与对流换热问题的无量纲准则方程式的建立	122
5.2 对流换热问题的计算	126
5.2.1 自然对流换热及实验关联式	126
5.2.2 强制对流换热及实验关联式	130
习题.....	141
第6章 辐射换热的基础理论及计算.....	144
6.1 辐射换热的理论基础	144
6.1.1 热辐射的基本概念	144
6.1.2 黑体辐射的基本概念与基本定律	146
6.1.3 实际物体的辐射特性	149
6.1.4 实际物体的吸收比和基尔霍夫定律	151
6.2 辐射换热的计算	153
6.2.1 两黑体表面间的辐射换热	153
6.2.2 角系数	154
6.2.3 多表面系统辐射换热的计算	159
6.2.4 辐射换热的强化与削弱	162
6.2.5 气体辐射	164
习题.....	170

第 7 章 复合换热与传热过程	172
7.1 复合换热与传热	172
7.2 传热过程及其计算	174
7.3 换热器与传热的平均温差	176
7.3.1 换热器简介	176
7.3.2 换热器传热的平均温差计算	179
习题.....	180
主要符号表	182
附录	184
参考文献	197

第 1 章 导 论

1.1 《传热学与流体力学基础》课程的研究对象及在机械工程领域中的应用

传热学是研究热量传递规律的科学。随着现代科学技术的飞速发展,在动力机械、能源、化工、冶金、建筑、机械制造、电子、生命科学、航空航天、农业及环境保护等领域,不断涌现出多种多样的热量传递问题,需要应用传热学解决。人类进入 21 世纪以来,世界各国成千上万的专家、学者、工程技术人员,在传热学的理论及强化、减弱热量传递的工程技术问题领域不倦地进行探索和研究,解决了人类衣食住行、上天入地的许多科学难题。同时也使得传热学的理论体系日趋完善,内容不断丰富,已经发展成为现代科学技术中充满活力和具有挑战性的重要技术基础学科。流体力学是研究物体的平衡和运动规律的科学。它研究流体流动的基本规律;研究流体绕过某种物体或通过某种通道时的速度分布、压强分布、能量损失及流体与固体的相互作用。由于流体在运动时具有连续变形的特性,因而它的运动规律比固体更为复杂。流体力学是动力机械与流体机械专业的极为重要的专业基础课程。

18 世纪 30 年代开始的欧洲工业革命,生产力的发展为自然科学技术的发展开辟了广阔的道路。在大发展大变革的时代,许多杰出的科学家应运而生,他们的杰出贡献导致了各类学科的创立和发展。其中在传热学和流体力学这两门学科发展中,贡献最突出的当数导热理论的奠基人法国科学家傅里叶(J. B. J. Fourier)与流体力学理论的奠基人纳维(M. Navier)和斯托克斯(G. G. Stokes)。傅里叶于 1807 年在实验的基础上提出了求解偏微分方程的分离变量法及可以将解表示成一系列任意函数的概念,并于 1822 年发表他的著名论著“热的解析理论”,成功地创建了导热理论。他提出的导热定律即傅里叶定律正确地概括了实验结果;他依据导热定律和能量守恒定律推导的导热微分方程是导热问题正确的数学描述;他提出的采用无穷级数表示理论解的方法成为微分方程求解的新途径。1823 年纳维提出了可用于不可压缩流体的流动方程,1845 年斯托克斯将其进一步改进为纳维-斯托克斯方程,奠定了描述流体流动基本方程的基础。随后,一系列科学家通过艰苦的探索,逐步建立了传热学与流体力学学科。两个世纪来在近代社会发展中不断出现的各种实际工程中,涌现出大量有关流体力学和传热学的问题,促使科技工作者及专家学者寻求解决问题的途径和方法。在计算机技术尚未发展成熟的时代,面对数学上无法求得理论解的复杂的纳维-斯托克斯方程和一系列换热微分方程,研究人员除了力求从数学理论上加以突破,另一有效途径就是通过实验来探求规律和寻求解决。因此,从传热学与流体力学发展完善的历史过程中,人们不仅可以看到数学、计算机的发展,更多地会看到实验科学与技术的发展。科学界公认传热学与流体力学都属于实验科学,科学工作者利用大量的实验结果丰富和发展了这两门学科,并总结出其中的科学规律,上升为基础理论。进入 20 世纪以来,数学与计算机科学的飞速发展,为传热学与流体力学的发展开辟了新的天地。大量传热学与流体力学问题的数值模拟成果不仅为解决许多技术关键立

下汗马功劳,也极大地丰富了这两门学科的内容。可以说,经典的传统的传热学与流体力学已经彻底、完全地焕发了现代的青春,成为现代科学技术中的重要学科领域。

《传热学与流体力学基础》课程是研究物体内部及其运动过程包括流体流动过程中的热量传递现象和规律的学科。当不同物体接触或物体发生运动时,只要有温差存在就不可避免地会出现热量的转移和交换。在机械工程领域,无论是固体还是液体的运动,都会出现涉及到安全、效率、能耗及设备性能的多种传热问题。借用著名德国物理学家普朗克的话:“科学是内在的统一体,它被分解为单独的部门不是由于事物的本质,而是由于人类认识能力的局限性。”今天,我们很容易理解为机械专业的学生开设《传热学与流体力学基础》课程的目的,即通过学习为学生提供解决问题的基本理论、主要方法及途径。例如,在机械制造热加工专业中,工件的加热、冷却、熔化和凝固与热量传递的规律密切关联。要获得高质量的加工工件,必须正确掌握不同工况下,不同材料、不同几何形状工件内温度场的变化规律,需要工程师在进行加工前就了解和测算工件的温度场,并能控制加工过程中温度场的变化。具备扎实的传热学流体力学基础知识,是一名机械工程师保证工艺执行、提高产品质量和产量的关键。而对于热加工过程中液态金属的流动、冷却规律的掌握,对液压传动、气力输送、润滑中与流体力学问题相互交叉、耦合的问题的解决,更需要工程技术人员具备《传热学与流体力学基础》的基本知识。2003年挑战者号航天飞机在返回地球时发生机毁人亡的悲剧就是隔热层的脱落所导致。航天飞行器在重返地球时以当地音速的15~20倍的高速进入大气层,在航天器表面附近发生剧烈的摩擦生热现象,会使气流局部温度高达5000~15000K。为了保证航天器的安全飞行,有效冷却技术、高效隔热层涉及制造、以及航天器本身的材料热性能就成为关键技术。在生命科学领域,人工心脏、心肺机、助呼吸机等医疗器械的运行、设计都与传热学与流体力学知识息息相关。因为这些机械设备的运行过程中都必不可免地与流体流动和热量传递相关联,如果不考虑流体运动的规律,忽视温度的变化就会导致生命的危机!

本教材针对机械工程专业的特点,较系统地阐述传热学与流体力学的基础知识、基本理论,培养学生一定的分析和计算技能,为学习有关专业课程打好理论基础。更进一步的目的是希望通过本课程的学习,有助于学生开拓思路,扩大视野,为认识机械工程领域不断发展的新理论、新工艺创造条件。

运动是永恒的。凡是有温差的地方就有热量自发地从高温物体向低温物体传递或是从物体的高温部分传向低温部分。从这点出发,可以毫不夸张地说,《传热学与流体力学基础》课程是现代机械工程专业大学生的重要技术基础课程。本书编者衷心希望高校本(专)科学生通过这门课程的学习,在亲历了传热学与流体力学学科领域的探索历程后,能掩卷思考发出“不虚此行”的感想。

1.2 《传热学与流体力学基础》的理论基础知识简介

1.2.1 传热学的研究对象和方法

传热学是一门研究由温差引起的热量传递规律的科学。在自然界和人类生活中,凡是有温差存在,按照热力学第一定律,热量必然会从高温向低温传递。从传热学的发展史可知,18世纪30年代英国开始的工业革命促进了生产力的空前发展,促进了传热学的发展。本节将简

要讨论和介绍传热学的基本概念,即热量传递的三种基本方式:导热、对流、热辐射及热量在进行传递的过程中所遵循的基本规律。具体的数学描述、微分方程及其在工程中的应用和基本计算将在其后的章节中详细论述。

1. 导热和傅里叶定律

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热,或热传导。

从微观角度看,物质的不同相态,即气体、液体、固体(导电固体和不导电固体)的导热机理各不相同。在气体中,导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。气体温度越高,其分子的运动动能越大,不同能量水平的分子相互碰撞的结果使热量从高温处传到低温处。在导电固体中,相当多的自由电子在晶格之间像气体分子那样,通过相互碰撞传递热量。在不导电固体中,热量传递是通过晶格结构(晶格结构的振动又被称为弹性波)的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。而对于液体的导热机理目前学术界尚未获得完全统一的认识。一种观点认为液体中导热的原因类似于气体分子的相互碰撞,只是液体分子间的距离较小,分子间的作用力对碰撞过程的影响远大于在气体分子间的作用力对碰撞过程的影响。另一种观点认为液体中导热的原因类似于非导电固体,主要依靠弹性波的作用。关于导热的微观机理可参考热物性学专著,不再赘述。本书以后的论述仅限于导热现象的宏观规律。

如前所述,通过众多科学家的实验及理论研究,导热现象所遵循的基本规律已经总结为傅里叶定律,其数学表达式为

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

傅里叶定律指出,导热热流量 Q 的大小取决于物体中沿导热热量传递方向上的温度变化率 $\frac{dt}{dx}$ 的大小、热量通过的物体面积 A 与表征材料导热能力的物性参数、热导率 λ 。因此,研究导热首先必须研究物体中的温度分布,即物体的温度在时间和空间的分布函数、温度场和温度变化率。还必须研究材料的性质、导热物体的几何形状与尺度。

按照温度场是否随时间变化将导热问题分为两类:一类是温度场中温度的分布不随时间发生变化的导热,即稳态导热;另一类是温度场中温度的分布随时间发生变化的导热,即非稳态导热。

按照物体的温度分布发生变化所考虑的不同坐标数目,导热问题又可分为一维稳态(非稳态)导热、二维稳态(非稳态)导热和三维稳态(非稳态)导热。

物体导热热量与通过面积大小的关系,主要取决于物体的几何形状。物体导热性能的优劣取决于物体材料的热导率大小及其影响因素。热导率是一种物性参数,本书只从工程应用的角度进行论述,更深入地讨论可参考热物性学有关专著。上述问题即是本书其后的导热一章研究讨论的主要内容。

2. 对流换热与牛顿冷却公式

对流换热是指由于流体的宏观流动,各部分之间发生相对位移,冷热流体互相掺混所引起的热量传递过程。由于流体中的分子同时在进行着不规则的热运动,故对流一定伴随着导热现象。工程上感兴趣的是流体流经固体表面时,流体与固体表面之间的热量传递现象。本书仅讨论流体与固体表面之间的对流换热。

计算对流换热热量 Q 的基本计算公式是牛顿冷却公式。通过面积为 A 的接触面的换热量数学表达式为

$$Q = hA \Delta t$$

对于单位面积的单位热流密度有：

$$q = h \Delta t$$

式中， Δt 为固体表面与流体的温差；比例系数 h 称为表面传热系数。

表面传热系数的大小与换热过程中的许多因素有关。它不仅取决于流体的物性，包括密度、比热容、热导率、黏性系数等，还与换热表面的形状、大小，特别是流动的速度、形态有密切的关系。需要指出的是，牛顿冷却公式所表达的只是在知道表面传热系数后如何进行对流换热热量的计算，并没有揭示如何获得表面传热系数，及影响表面传热系数的种种复杂因素的具体关系式，它仅仅给出了表面传热系数的定义。因而，研究对流换热的根本任务是应用理论和实验的方法求得各种情况下的表面传热系数，最终计算对流换热热量。这也是本书对流换热一章研究讨论的主要内容。

3. 辐射换热与四次方定律

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。研究和实践表明，物体会因各种原因发出辐射能。而物体由热的原因产生的电磁波辐射发出的辐射能即为热辐射。

自然界中各个物体都不停地向空间发出热辐射，同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。这个辐射与吸收过程的综合结果就形成物体间以辐射方式进行热量传递的现象，这就是传递热量的三种基本方式之一，辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时，辐射换热量为零，但此时是动态平衡，辐射与吸收过程仍在不停地进行。

与导热、对流换热同样，辐射换热在许多工程热物理领域中具有重要的应用。但辐射换热与导热、对流换热有两个重要的不同特点。首先，辐射换热可以在真空中进行，具有强烈的方向性。而且在真空中辐射换热最有效。两个物体被真空隔开时，例如外层空间的太阳和地球之间，导热和对流换热都不会发生，热量传递只能以辐射换热的方式进行。其次，由于物体内部微观粒子的热运动状态发生改变时激发出来的电磁波，在被吸收后又转变为热能，表明热辐射过程能量形式发生了转变。辐射换热发生时不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式的转换，即发射时从热能转换为辐射能，被吸收时又从辐射能转换为热能。

任何物体只要温度高于 0 K ，就会不停地向周围空间发出热辐射。实验表明，物体的热辐射能力与温度有关，同一温度下不同物体的辐射与吸收的能力也大不相同。辐射能与温度和波长均有关。

为了表示热辐射的基本规律，提出了黑体的概念。黑体是指能吸收投入到其表面上的所有热辐射能的物体。它是一种科学假想的物体，现实中并不存在，但却可以人工制造出近似的人工黑体。人工黑体在相同温度的物体中，具有其辐射能力最大的属性。

基于对辐射换热上述规律的理论和实验研究，1879年斯忒藩通过实验确立，1894年玻尔兹曼从理论上证明了黑体在单位时间内发出的热辐射热量取决于其绝对温度的四次方，即著名的斯忒藩-玻尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann Law)，又称四次方定律：

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad E_b = C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ W/m}^2$$

式中， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，称为 Stefan-Boltzmann 常数。 $C_b = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，

称为黑体辐射系数, C_1, C_2 分别为第一, 第二辐射常量。

傅里叶定律、牛顿冷却公式和斯忒藩-玻尔兹曼定律对稳态和非稳态传热过程都是适用的。对非稳态过程, 所求温度都是瞬时值, 其温度分布不仅与坐标有关, 还是时间的函数。

上面对传热学的三种基本热量传递方式作了简单介绍。可以看出, 它们各自遵循不同的规律, 在计算方法上各有不同, 本书在后面的章节将分别予以讨论和分析。

1.2.2 流体力学基本概念及简介

上一节简要介绍了传热学的研究对象与研究方法等基本概念, 本节将对涉及到传热问题的有关流体力学的基本概念, 主要是对液体的物理性质进行讨论和介绍, 从而使读者对流体力学的研究对象和研究方法有基本的了解。

1. 流体

在常温常压下, 物质可存在固态、液态和气态三种聚集状态(在高温和高压情况下, 还有等离子态和超固态), 它们分别为固体、液体和气体。液体和气体又合称为流体。固体和流体的表观差别是前者具有一定的形状, 不易变形, 而后者则无一定的形状, 且易于变形, 即具有一定的流动性。与固体及液体相比较, 气体在受到压强或温度变化时, 体积有较大的改变; 液体通常存在自由表面, 这是固体及气体所没有的。

物质所表现出来的这些外部宏观性质的差别是由其内部微观结构、分子热运动和分子间的作用力决定的。任何物质都是由大量分子构成。根据热动力学假设, 分子处于永不停息的随机热运动和相互碰撞之中。同时各分子之间还存在一种相互作用力, 当分子之间的距离较近时, 作用力以吸引为主, 其主要来源于分子间电偶极距(核外的电子云中心与核不重合而产生)所极化而引起的相互作用。当分子非常接近时, 作用力以排斥为主, 这是由于各分子外层电子云开始重叠而产生的排斥作用。

1mol 的任何物质, 都包含有 6.0221367×10^{23} 个分子(阿伏加德罗常数)。在常温常压下的气体, 1cm³ 体积中约含有 2.7×10^{19} 个分子, 因而分子间的平均距离约为 3.3×10^{-7} cm(为分子线尺度的 10 倍)。液体的分子间平均距离则较小, 约为 10^{-8} cm。固体则比液体更小些。因此, 气体分子之间作用力很小, 分子近似作自由无规则的运动, 以致气体无一定的形状, 易于压缩, 并各向同性。固体由于分子间距离最小, 作用力也就最大, 分子几乎呈固定排列, 形成远程有序晶格, 成为各向异性的晶体。若晶格远程大于 $15\text{\AA} = 15 \times 10^{-8}$ cm 排列无序时, 就是各向同性的非晶体。固体分子的热运动仅在其平衡位置附近做振荡, 故固体具有一定的形状和体积。液体分子间的距离比固体的稍大(大 1/3 左右), 因而作用力也仅比固体的稍小, 其分子排列则与非晶体相似。因而液体有一定的体积, 难于压缩, 且各向同性。液体分子热振荡的振幅比固体稍大, 且其平衡位置经常变动, 在平衡位置上逗留的时间也长短不一, 其平均逗留时间称定居时间 τ 。 τ 的长短取决于分子力的大小和分子无规则运动的强弱, 分子力愈大, 定居时间愈长。温度愈高, 分子无规则运动也愈烈, 平衡位置也愈易改变, 即定居时间愈小。一般情况下, 液体受外力的作用时间 t 比定居时间 τ 大得多(一般金属液体的定居时间约为 10^{-10} s), 在这段时间内, 液体将沿外力方向移动平衡位置, 引起液体的流动, 形成液体的易流动性。

物质三态在一定的条件下会相互转化, 例如, 每当温度改变到一定程度, 分子热运动足以破坏某种特定相互作用形成的秩序时, 物质的宏观状态就可能发生突变, 形成另一种聚态, 这就是所谓相变。相变时有两个显著现象发生, 一是相变中发生体积变化。物质从固相转变为

液相时,体积变化约为 10%,气相变为液相时,体积的变化则随温度而不同。相变时的另一现象是产生潜热,气化、溶解、升华时吸热,凝结、凝固、凝华时放热。表 1.1 为一些物质和元素的熔解热及气化热。

应当指出,有些物质,例如沥青(非晶体),其相变过程与水等物质是不同的。当温度升高时,固态沥青先是由硬变软,然后由稠变稀,最后才成为液体,固液两态无明显界限。对这种情况,有时就只能用黏度系数 μ 值来划分,当 $\mu < 10^{14}$ Pa·s 时,定为液态,当 $\mu > 10^{14}$ Pa·s 时,定为固态。

表 1.1 一些物质的熔解热与气化热

物 质	正常熔点/K	熔解热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	正常沸点/K	气化热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
水 H_2O	273	334	373	2257.0
醋酸 CH_3COOH	290	196.7	391	406
苯 C_6H_6	279	126	353	393.9
氧 O_2	328	13.8	363	213.9
二氧化碳 CO_2	217	180.8	195 (升华)	554.2(升华)
酒精 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	159	109.3	351	837.2
氨 NH_3	195	351.6	240	1366.3
铁 Fe	2081	314.0	3296	6279
硫 S	659	39.1	991	287.2

一般认为,物质形成三态是分子间相互作用的有序倾向及分子热运动的无序倾向共同作用的结果。固体分子间相互作用力较强,无规则运动较弱,有固定的形状和体积,不易变形和压缩;气体分子间作用力较弱,无规则运动剧烈,无固定形状和体积,易于流动和压缩;液体特征介于固体和气体之间,有一定的体积,但无固定的形状,易变形,不易压缩。其主宰因素复杂,至今尚未有一套完整的液体物性理论。

2. 流体的连续介质假设

流体力学研究流体的宏观运动,不直接研究流体物质粒子本身,而是从这些物质现象导出的一种模型,即连续介质模型。连续介质模型认为(假设)物质连续地无间隙地分布于物质所占有的整个空间,流体宏观物理量是空间点及时间的连续函数。

显然,物质的空间连续分布与物质本身的离散结构不同。那么,采用连续介质假设能否在某种意义下协调一致?此外物质宏观物理量如何确定,怎样与微观结构性质相联系?这是流体力学研究的一个最基本和最关键的问题。

研究流体的宏观运动虽也可以从微观(粒子理论)入手,并已获得部分成功。但一方面由于基本粒子规律本身尚未完全建立,即使依目前建立起来的规律能用于研究宏观运动,但每当发现基本粒子的一个更基本性质时,又得从头修改,而粒子理论的发展,原则上讲是无穷尽的;另一方面,用微观方法研究在数学上还有不少困难,而且由于物质结构的复杂性,研究中通常采用统计平均的方法,常使基本粒子的一些细节与物质宏观力学行为无直接关联,这就失去了从粒子根本规律出发的原来意义。因此,目前研究流体的宏观运动一般都采用宏观方法。

采用宏观方法研究流体的宏观运动,意味着不考虑单个粒子运动及其物理量,而是考虑大量粒子的平均运动及其统计特性,如速度、密度、温度等。显然,这里涉及到平均尺度的问题。即所选取的平均尺度既能反映物理量在空间各点处的不同分布状况,又不受分子随机运动的影

响。例如采用约为 10^{-3} cm 这一尺度作为一个长度尺度,在这一尺度相应的体积上对质点统计平均,可以确定密度这一宏观物理量(确定其他物理量也大致相仿)。

如果以分子间平均距离(对气体为 10^{-7} cm,对液体为 10^{-8} cm)或气体分子平均自由程(10^{-6} cm)作为粒子结构的一个长度尺度,记作 l ,将空间密度等物理量有显著变化的尺度记作 L ,则选用 α 作为流体宏观物理量统计平均合理的尺度应是:

$$l \ll \alpha \ll L$$

在大多数流体力学问题中, L 的尺度一般远大于 1mm,远比粒子结构的尺度 l 大得多,采用 $l \ll \alpha \ll L$ 这样的 α ,意味着采用比粒子结构的尺度大得多的尺度,粒子结构的尺度微乎其微,可以忽略。这样可以不把物质看作为由离散粒子构成,而认为物质连续地占满其所有的空间,它们在所取尺度上具有物理量的统计平均值,并在空间上连续分布。这就是流体力学中所采用的一种假想化的介质,称为连续介质。

采用连续介质的概念研究流体的运动时,研究对象是质点,它是指一个流体微团。这个流体微团是比微观粒子结构尺度大得多,而比宏观特征尺度小得多的流体团。故质点包含着大量分子,但相比宏观特征尺度(例如密度、速度有显著变化的尺度),它又很小。即它在微观上充分大,在宏观上充分小。质点具有的物理量是均匀的,它是其中大量粒子的统计平均值。连续介质就由这些连续分布着的质点组成。

引入连续介质这一概念来自数学上的要求,按照质点的概念,可以认为质点的物理量就是流体所在空间上空间点(同样,也是时间上)的连续函数。在物理上研究流体宏观运动的意义也是合理的。实验表明,基于连续介质假设而建立起来的流体力学理论是正确的。

在宏观意义下连续介质假设成立的条件是,所考虑的物理问题的尺度远大于粒子结构尺度。例如,飞机、船舶在空气、水中的运动,其特征长度例如船的长度,远大于粒子结构尺度。空气和水被认为是连续介质;血液在动脉中的流动(红血球的直径约为 8×10^{-4} cm,它在直径约 0.5cm 的动脉中流动),血液就被当作连续介质;甚至当研究星系结构时,恒星间的距离约为 4×10^{18} cm,他们在半径约为 4×10^{22} cm 的银河系中运动,星系也是一种连续介质。

然而,在研究高空稀薄气体中的物体运动时,分子平均自由程很大,与物体特征长度尺度相比为同量阶,这时就不能视稀薄气体为连续介质。同样,血液在微血管(其直径可达 10^{-4} cm 量阶)中的运动,也不把血液当作连续介质。这是连续介质应用范围的限制。

3. 流体的可压缩性与热膨胀性

1) 流体的密度、相对密度和比体积

密度、相对密度与比体积是流体最基本的物理量。

(1) 流体密度 ρ 是流体中某空间点上单位体积的平均质量,即

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow \Delta\tau_0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau}$$

上式中的 $\Delta\tau_0$ 宏观上取得足够小,而微观上又足够大。为了数学处理的方便,通常将上式写为

$$\rho(x, y, z, t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow \Delta\tau_0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau} = \frac{dm}{d\tau}$$

密度是空间位置及时间的函数,其单位为 kg/m^3 。

已知密度 ρ ,流体的微体积元 $d\tau$ 内的质量应为 $dm = \rho d\tau$,而体积 τ 内的质量应为 $m = \int_{\tau} \rho d\tau$ 。

(2) 流体的相对密度。相对密度是流体的质量与同体积水在 4°C 时的质量之比,或是该流体的密度与 4°C 水的密度之比,以 δ 表示,

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{4^{\circ}\text{C水}}}$$

显然,相对密度是量纲为 1 的量。

(3) 流体比体积。比体积是密度的倒数,即单位质量流体所占有的体积。以 v 表示:

$$v = \frac{1}{\rho}$$

其单位为 m^3/kg 。表 1.2 是几种常见流体的密度。

表 1.2 常用流体的密度

流体名称	温度/°C	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	流体名称	温度/°C	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
二氧化碳	300	1.773	乙二醇	300	1111.4
空气	250	1.3947	氟里昂	280	1374.4
	300	1.1614	润滑油	300	884.1
氧气	300	1.284	甘油	300	1259.9
氮气	300	1.1233	水银	300	13529
一氧化碳	300	1.1233	纯水	288	999.1
氦气	300	0.1625	纯水	278	1000.0
氢气	300	0.08078	水蒸气	400	0.5542

流体密度值除依流体的种类不同外,还取决于流体的压强和温度。当流体是多组分的混合物时,密度还是各种组分浓度的函数。例如,海水是水与各种溶解盐的混合物,海水密度常认为是压强、温度及盐度(盐度是单位质量海水中溶解盐的质量,以 ζ 表示)的函数: $\rho = \rho(p, T, \zeta)$;大气是干空气(干空气本身是一种混合物,但常可把它认为是单一组分气体)与水汽的混合物,大气密度是压强、温度及比湿(单位质量空气中含有的水汽质量,称为比湿,以 q 表示)的函数: $\rho = \rho(p, T, q)$ 。

2) 流体的可压缩性与热膨胀性

流体的可压缩性是指流体在外力作用下,其体积或密度可以改变的性质;流体的热膨胀性则是流体在温度改变时其体积或密度可以改变的性质。

从物理学可知,对单一组分的流体,如水、空气等,其密度随压强与温度而改变,密度的改变量为

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{\partial \rho}{\partial T} dT = \rho \gamma_T dp - \rho \beta dT$$

其中, $\gamma_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$ 称为等温压缩率, $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ 称为热膨胀系数。

等温压缩率是衡量流体可压缩性的物理量,它表示在一定温度下压强增加一个单位时,流体密度的相对增加率。由于比体积 v 为密度 ρ 的倒数: $v\rho = 1$,因此

$$\gamma_T = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

该式表示,等温压缩率表示在一定温度下压强增加一个单位时流体体积的相对缩小率。

等温压缩率 γ_T 的倒数为体积弹性模量 E :

$$E = \frac{1}{\gamma_T} = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \quad (1-1)$$

它表示流体体积的相当变化所需的压强增量。表 1.3 是一些常见流体的等温压缩率 γ_T 及体积弹性模量 E 的值。

严格说来,实际流体都是可以压缩的,只是程度不同而已。但在流体力学中,为了处理问题的方便,常将压缩性很小的流体近似看作不可压缩流体;它的密度可看作为常数,即指同一流体的密度视为不变,否则就是可压缩流体。

表 1.3 一些常见流体的 γ_T 及 E 值

流 体	$\gamma_T / (\times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$E / (\times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^{-2})$
二氧化碳	64	1.56
酒精	110	0.909
甘油	21	4.762
水银	3.7	27.03
水	49	2.04

热膨胀系数表示在一定压强下,温度增加 1K 时流体密度的相对减小率。与等温压缩率类似,它也可写为

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1-2)$$

它表示在一定压强下,温度增加 1K 时流体体积的相对增加率。表 1.4 给出一些液体的热膨胀系数。

表 1.4 一些液体的热膨胀系数

液 体	温度/K	$\beta \cdot 10^3 / \text{K}^{-1}$
润滑油	300	0.7
乙二醇	300	0.65
甘油	300	0.48
氟里昂	300	2.75
水银	300	0.181
饱和水	300	0.276

1.3 传热学和流体力学研究方法与单位制

1. 学习研究方法

传热学和流体力学都是实验科学,必须坚持“实践是检验真理的唯一标准”的原则从事研究和学习,走进传热学和流体力学的世界。在学习前人通过实验总结出的规律性的理论的基础上,学会如何用基础理论知识分析研究实际工程中具体问题的方法和技巧,并最终解决实际工程中出现的各种不同类型的问题。学科的创新就是在此基础上去探求未知世界,发现新的规律和建立新的理论。

同机械工程专业的许多技术基础课一样,本课程需要学生具备扎实的数学、物理等基础知识,要善于把实际问题抽象为数学物理模型,不断从学习中提高分析问题、解决问题的能力。