

概 述

工程领域所依托的基础理论主要有三大力学知识,即理论力学、材料力学和流体力学,缺一不可。工程流体力学是研究宏观流体的平衡、运动规律及其在工程中的应用的一个力学分支。流体物质广泛地存在于自然界中,人类对于流体的平衡与运动规律以及流体与固体间的相互作用规律进行着不懈的探索,形成了日益完善的学科体系。

1.1 工程流体力学的研究对象

所谓的流体,一般意义上是指具有流动性的物质,这种物质在受到拉伸或剪切作用时,会产生极大的变形。在工程流体力学的研究范畴内,宏观上通常将流体视为由单一均质无空隙的连续的流体质点组成的集合体,即保持流动性的连续性介质。

1.1.1 流体的连续性假设

我们知道,实际流体是由大量不间断无规则热运动的分子所组成的。微观上看,分子间有空隙,在空间上是不连续的;同时,由于分子做无规则热运动,分子具有的各种物理量(如温度、位置等)在时间上的分布也是不连续的。这就会给我们的研究工作造成困难,所以,在工程流体力学的研究中,根据工程应用的实际需求,对其进行合理的简化。

从微观上讲,流体的分子体积及分子间距极小。例如在标准状态下,1m³ 的液体中约含有 3.3×10^{28} 个分子,相邻分子的间距约为 0.31nm; 1cm³ 的气体中约含有 2.7×10^{19} 个分子,相邻分子的间距约为 3.2nm(图 1-1)。可见,分子间距是相当小的,在很小的体积里已包含了难以计数的分子。如此微小的分子间距与工程应用中的最小测距单位相比,至少要小几个数量级。在实际工程中往往是要解决流体的宏观特性而不是微观运动的特性,为便于分析研究,1753 年欧拉提出了以连续介质的假设作为宏观流体模型,即,忽略流体分子的间距,把流体视为由无间隙的微小流体体积构成的连续集合体,这就是流体的连续性假设。这种微小的流体体积称为流体质点。

对于连续的流体介质,流体的运动空间(流场)中的各物理量均可视为空间和时间的连续函数。这样,就可以利用数学中的连续函数分析方法来研究流体运动问题。实践表明,

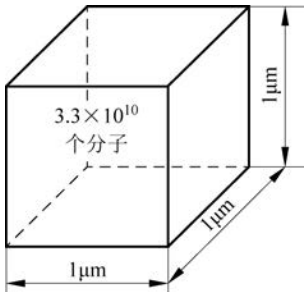


图 1-1 液体分子所占空间示意图

采用流体的连续介质模型,对于解决一般工程中的流体力学问题是可以满足要求的。

1.1.2 流体的流动性

与固体不同,流体具有很强的流动性,在受到拉力与剪切力作用时,主要靠分子间作用力抵抗变形,而分子间作用力有限,故流体呈现出流动性。这种变形即为“动”,连续的剪切变形即为“流动”。由于具有流动性,因而流体没有固定的形状。

不同种类的流体,在受到拉伸与剪切作用时,所产生的抵抗变形的特性也不同。在工程领域中,由于应用环境的复杂性,即便是同一种流体,其流动性也会发生较大的改变,甚至失去流动性。例如,在 1 个大气压下,当环境温度低于 0°C 时,水将转变为固体;而常温条件下,当承受的压力达到 1GPa 时,水也将转变为固体。除环境温度、压力因素的影响以外,流体中侵入的杂质以及由此所产生的化学变化等,都可能影响流体的流动性,在工程应用中需要对此加以留意。

1.2 流体力学的研究方法

1. 理论研究方法

利用物理规律建立流体力学的数学模型,利用数学方法进行求解与研究。这种方法能够揭示流体运动的物理规律,研究的结论具有普遍适用性。

2. 数值计算方法

建立简化的流体力学的数学方程,采用计算机数值计算技术进行求解,得出相应的结果。由于数学模型以及计算技术等的局限,通常把计算结果与实验结果进行对照。

3. 实验研究方法

由于实际流体力学问题的复杂性,即便是在目前计算技术高度发展的条件下,许多实际问题仍难以完全依赖理论计算解决,仍然需要依靠实验的方法。实验研究中常采用实物实验、比拟实验和模型实验等方法。

1.3 流体力学的工程应用与发展历程

在人类文明的发展过程中,对于流体的特性以及流体与固体等的相互作用的研究一直没有间断,从而积累了丰富的流体力学方面的应用经验,创造了灿烂的成果。从铜壶滴漏、水排、水磨,到蒸汽机、现代工业技术航空航天技术等,均与流体力学的发展与应用有着密不可分的联系。流体力学的发展是与人类的生活与生产劳动密切相关的。

原始人们的石器投掷、弓箭应用中已涉及空气中物体运动的经验总结。开沟引渠的技术应用,更是与流体的流动现象紧密相关。例如,早在新石器时代的马家浜文化时期,浙江

吴兴邱城遗址的下层(公元前 4700 年前后),在其建筑遗址附近发现了 9 条排水沟以及 2 条宽 1.5~2m 的引水渠,可见当时的原始居民已掌握了利用木、石、骨等工具开挖引排沟渠的技术。早在 4000 多年前的大禹治水,说明我国古代已有大规模的治河工程。

我国古代三大水利工程(都江堰、郑国渠、灵渠)修建于公元前 256—公元前 210 年,这些大型工程的建造与应用,说明我们的先辈对明渠水流和堰流流动规律的认知非常精深。都江堰水利工程迄今屹立两千四百余年(图 1-2),依然发挥着应有的作用,为亿万炎黄子孙造福,堪称人类文明史上的奇迹。大约与此同时,古罗马人建成了大规模的供水管道系统。



图 1-2 都江堰水利工程

在公元前 250 年,阿基米德发表学术论文《论浮体》,提出了著名的阿基米德原理。这是关于流体静力学的第一部著作,标志着流体力学的开端,是流体力学发展史上的重要里程碑。

东汉杜诗(公元 37 年)创造水排,用水驱动鼓风囊,进行冶金,较西欧约早了 1100 年。北宋(960—1126)在运河上建成真州(现江苏仪征)船闸,是全世界首次出现的复闸工程,解决了船只翻越不同高度的河流(翻坝)的技术难题,是世界航运工程的重要发明创造,至今仍是现代船闸节水技术中重要的手段。比 14 世纪末荷兰的同类船闸约早 300 多年。

公元 17 世纪至 20 世纪是流体力学初步形成与发展的时期,以欧拉方程和伯努利方程的提出为主要标志,逐步建立起流体力学的理论体系与实验方法。1653 年,帕斯卡(1623—1662)提出了帕斯卡原理。1687 年,牛顿(1642—1727)在《自然哲学的数学原理》中提出了流体摩擦定律,为黏性流体力学初步奠定了理论基础。清朝雍正年间(1722—1735),何梦瑶在《算迪》中提出流量等于过水断面积乘以断面平均流速的算法。1738 年,伯努利(1700—1782)出版了《流体动力学》,建立了伯努利方程。

1755 年,欧拉(1707—1783)发表了《流体运动的一般原理》,提出了流体的连续介质模型,建立了理想流体的运动微分方程。1822 年,纳维建立了黏性流体的基本运动方程;1845 年,斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程,这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称 N-S 方程),它是流体动力学的理论基础。1883 年雷诺(1842—1912)利用实验方法证实了流体的两种流动状态——层流和紊流,找到了雷诺数,以及临界雷诺数,为流动阻力的研究奠定了基础。

20 世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展,期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况和阻力等问题。1935 年以后,人们综合了水动力学和空气动力学两方面的知识,建立了统一的体系,统称为流体力学。这个时期的主要研究成就促进了流体力学在实验和理论分析方面的进一步发展。

1904 年,普朗特(1875—1953)建立了边界层理论。之后又针对紊流边界层,提出混合长度理论。

1911—1912 年,卡门(1881—1963)在连续发表的论文中提出了带旋涡尾流及其阻力的理论,人们称这种尾涡的排列为卡门涡街。1940 年,美国华盛顿州的塔科马峡谷中一座主跨度为 853.4m 的大桥,建成 4 个月后,于当年 11 月 7 日损毁。研究认为,由于气流流经边

墙后产生的卡门涡街引起了与流动方向垂直的交变扰动分力,导致桥梁发生共振而受到破坏。

1930年,卡门又提出了计算紊流粗糙管阻力系数的理论公式。在紊流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面都有不少贡献。

1933年,尼古拉兹公布了对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹曲线。

1938年,钱学森在发表的论文中,提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门-钱学森解法。他在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域做出过许多开创性的贡献。

1944年,莫迪给出管道的当量糙粒阻力系数图——莫迪图。

20世纪下半叶以来,随着大工业的形成,高新技术工业的出现和发展,特别是电子计算机的广泛应用,大大地推动了科学技术的发展。采用电子计算机利用数值计算方法,可探讨以往的分析方法难以研究的课题,计算流体力学这一新的分支学科应运而生。同时,由于民用和军用生产的需要,液体动力学等学科也有很大进展。

从20世纪60年代起,由于工业生产和尖端技术的发展需要,促使流体力学和其他学科相互浸透,形成新的交叉学科,如物理-化学流体动力学、磁流体力学等。流体力学的研究内容也更为广泛,开始研究气象、海洋、石油、化工、能源、环保和建筑等领域中的流体力学问题,形成了许多边缘学科,使这一古老的学科发展成包括多个学科分支的全新的学科体系,焕发出强盛的生机和活力。

依据现行国家标准《学科分类与代码 GB/T 13745—2009》,力学类(130)中,流体力学(130.25)包含以下20余种分类:理论流体力学(130.2511);水动力学(130.2514);气体动力学(130.2517);空气动力学(130.2521);悬浮体力学(130.2524);湍流理论(130.2527);黏性流体力学(130.2531);多相流体力学(130.2534);渗流力学(130.2537);物理-化学流体力学(130.2541);等离子体动力学(130.2544);电磁流体力学(130.2547);非牛顿流体力学(130.2551);流体机械流体力学(130.2554);旋转与分层流体力学(130.2557);辐射流体力学(130.2561);计算流体力学(130.2564);实验流体力学(130.2567);环境流体力学(130.2571);流体力学其他学科(130.2599)。

1.4 计算流体力学概述

流体力学的发展和其他学科一样,主要的研究方法也是理论分析和实验研究,分为理论流体力学和实验流体力学两大分支。20世纪初期提出了用数值方法求解流体力学的思想,但限制于问题的复杂性和计算工具的落后,一直发展缓慢。直到计算机技术迅猛发展,为流体进行数值模拟提供了强有力的手段,流体主要应用的学科是计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD),它以计算机为载体,融合了近代流体力学、数值数学和计算机科学等学科,应用多种离散化数学方法,可以对所有涉及流体流动、热量交换、分子运输等现象的具体问题进行分析 and 模拟,是一个具有强大生命力的学科。

CFD是利用计算机程序求解流体流动及传热问题的一门交叉学科,是在流体基本方程

(质量、动量、能量的守恒方程)控制下对流动的数值模拟。其基本思想是把在时间及空间上连续的物理量的场,如速度场、压力场,用一系列有限个离散点上的变量值的集合代替,通过一定的原则和方式建立起这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组以获得场变量的近似值。

进入 21 世纪后,近十多年以来,CFD 技术有了很大的发展,各种商业软件层出不穷,功能越来越完善,应用范围也越来越广。其基本思想是应用流体力学三大基本方程,把连续的物理量用有限个离散点上的变量集合来表示,通过求解代数方程组的方式就能够得到每个离散点所代表连续物理量的近似值。CFD 技术不仅可以作为一个求解流体问题的研究工具,还可以作为设计工具在航空航天、石油化工、工业制造、海洋结构工程、水利工程、环境设计、生物工程、气象学等领域发挥重要作用,逐渐成为流体力学领域的研究热点。

本书第 10 章首先介绍了 CFD 分析的理论基础,包括控制工程及其通用形式、物理边界条件、控制方程的离散、代数方程的数值求解等;其次,在简要介绍常用 CFD 商业软件后,给出了 CFD 分析的一般过程;最后,以作者开展的滚动转子压缩内制冷剂的流动分析为例,详细介绍了 CFD 方法用于流动分析的工程实践。

思考题与习题

- 1-1 工程流体力学的研究内容是什么?
- 1-2 流体是什么? 流体质点与几何学中的点有何不同?
- 1-3 流体可以承受哪些作用力? 力有三要素,那么流体所受的作用力大小如何? 方向怎样? 作用点在哪里?
- 1-4 真实的流体是连续的吗? 为什么在本课程中我们可以把流体看作连续介质?
- 1-5 流体力学的研究方法有哪些?

第 2 章

流体的物理性质

2.1 流体的概念

流体是液体和气体的总称,是由大量的、不断地做热运动而且无固定平衡位置的分子构成的,它的基本特征是没有一定的形状和具有流动性。在流体的形状改变时,流体各层之间也存在一定的运动阻力(即黏滞性)。当流体的黏滞性很小时,可近似看作理想流体(仅在理论上假设存在的没有黏滞性的流体)。流体都有一定的可压缩性,液体可压缩性很小,而气体的可压缩性较大。当流体的黏滞性和可压缩性都很小时,可近似看作不可压缩理想流体。不可压缩理想流体是为了便于研究工作而人为引入的理论上的假设模型。

2.2 密度和相对密度

流体同其他物体一样,具有质量。流体的密度和比容是流体的重要属性。

2.2.1 密度

流体的密度以单位体积流体所具有的质量来表示,它表示流体在空间的密集程度,以符号 ρ 表示。

取包围空间某点微元体积 ΔV ,其中所含流体质量为 ΔM ,比值 $\Delta M/\Delta V$ 即为 ΔV 中之平均密度。若令 $\Delta V \rightarrow 0$,即当 ΔV 向该点收缩趋近于零时为该点的流体密度,即

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2-1)$$

式中, ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

M ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度 ρ 随着它所处的压力 p 和温度 T 而变化,即 $\rho = \rho(p, T)$ 。又因为压力和温度都是空间点坐标和时间的函数,所以,密度也是空间点坐标和时间的函数,即 $\rho = \rho(x, y, z, t)$ 。水、空气和水银在不同温度下的密度值见表 2-1。

表 2-1 不同温度下水、空气和水银的密度(kg/m³)

流体	温度/℃						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94
水银	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350

2.2.2 相对密度

某均质流体的质量与 4℃同体积纯水的质量的比率称为该流体的相对密度,用符号 d 表示,即

$$d = \frac{\rho V}{\rho_w V} = \frac{\rho}{\rho_w}$$

(2-2)

式中, ρ_w ——4℃纯水的密度(kg/m³)。显然, d 为一个无量纲量。

表 2-2 列出了几种常见流体在 1atm 下的密度和相对密度。

表 2-2 常见流体的密度和相对密度

流 体	温度/℃	密度/(kg/m³)	相 对 密 度
空气	0	1.293	0.001 29
氧	0	1.429	0.001 43
氮	0	1.251	0.001 25
一氧化碳	0	1.250	0.001 25
二氧化碳	0	1.976	0.001 98
水蒸气	0	0.804	0.000 80
蒸馏水	4	1000	1
海水	15	1020~1030	1.02~1.03
普通汽油	15	700~750	0.70~0.75
石油	15	880~890	0.88~0.89
酒精	15	790~800	0.79~0.80
水银	0	13 600	13.6
甲醇	4	810	0.81
煤油	15	750	0.75
矿物系液压油	15	850~900	0.85~0.90

2.3 压缩性和温度膨胀性

2.3.1 压缩性

液体受压力的作用发生体积变化的性质称为可压缩性,常用体积压缩系数 K 表示。其物理意义是单位压力变化所造成的液体体积的相对变化率,即

$$K = -\frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{\Delta p} \quad (2-3)$$

式中, K ——体积压缩系数, Pa^{-1} ;

ΔV ——液体的体积变化量, m^3 ;

V_0 ——液体的初始体积, m^3 ;

Δp ——液体的压力变化量, Pa 。

因为压力增大即 $\Delta p > 0$ 时, 液体的体积减小即 $\Delta V < 0$, 为使 K 取正值, 故在式(2-3)右端加一负号。常用矿物油型液压油的体积压缩系数值为 $(5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ 。

体积压缩系数 K 的倒数称为体积弹性模量, 以 β_e 表示, 即

$$\beta_e = K^{-1} \quad (2-4)$$

液压油的体积弹性模量 $\beta_e = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{Pa}$, 为钢的体积弹性模量的 $0.67\% \sim 1\%$ 。当液压油中混有空气时, 其体积弹性模量将显著减小。

2.3.2 温度膨胀性

液体的温度膨胀性由温度膨胀系数 K_t 表示。 K_t 是指单位温度升高值(1°C)所引起的液体体积变化率。

$$K_t = \frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{\Delta t} \quad (2-5)$$

式中, Δt ——温升, $^\circ\text{C}$ 。

K_t 是压力与温度的函数, 由实验决定。水和矿物油型液压油的温度膨胀系数如表 2-3、表 2-4 所示。

表 2-3 水的温度膨胀系数 $K_t \times 10^6 (1/^\circ\text{C})$

压力/ MPa	温度/ $^\circ\text{C}$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.1	14	150	422	556	719
10	44	166	422	548	704
20	73	184	426	539	—
50	130	237	429	523	660
90	150	291	437	514	619

表 2-4 矿物油型液压油的温度膨胀系数 $K_t (1/^\circ\text{C})$

15 $^\circ\text{C}$ 时的密度/ (kg/m^3)	700	800	850	900	920
K_t	8.2×10^{-4}	7.7×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}

2.4 黏 性

2.4.1 黏性的物理本质

流体在外力作用下流动时,由于流体分子间的内聚力作用,会产生阻碍它相对运动的内摩擦力,流体的这种特性称为黏性。

2.4.2 流体内摩擦定理

如图 2-1 所示,两平行平板间充满液体,下平板固定,上平板以速度 v_0 右移。由于液体的黏性,下平板表面的液体速度为零,中间各层液体的速度呈线性分布。

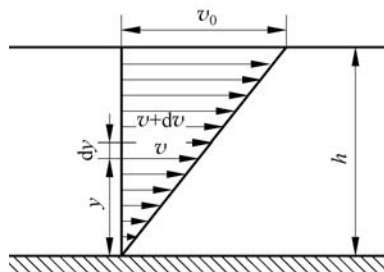


图 2-1 液体的黏性示意图

根据牛顿内摩擦定律,相邻两液层间的内摩擦力 F_f 与接触面积 A 、速度梯度 $\frac{dv}{dy}$ 成正比,且与液体的性质有关,即

$$F_f = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (2-6)$$

式中, μ ——液体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

A ——液层间的接触面积, m^2 ;

$\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度, s^{-1} 。

将上式变化成

$$\mu = \frac{F_f}{A \frac{dv}{dy}} = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (2-7)$$

式中, τ ——液层单位面积上的内摩擦力, Pa 。

由式(2-7)可知,液体黏度的物理意义是:液体在单位速度梯度下流动时产生的内摩擦切应力。

2.4.3 黏度

黏性的大小用黏度来衡量。工程中黏度的表示方法有以下几种：

1. 动力黏度

式(2-7)中的 μ 称为动力黏度,其法定单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2. 运动黏度

液体的动力黏度与其密度的比值,无物理意义,因其量纲中含有运动学参数而称为运动黏度,用 ν 表示。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-8)$$

我国液压油的牌号均以在 40°C 时运动黏度的平均值来标注。例如, N46 号液压油表示它在 40°C 时,平均运动黏度为 $46\text{mm}^2/\text{s}$ 。

3. 相对黏度

相对黏度是指液体在某一测定温度下,依靠自重从恩氏黏度计的 $\phi 2.8\text{mm}$ 测定管中流出 200cm^3 所需时间 t_1 与 20°C 时同体积蒸馏水流出时间 t_2 的比值,用符号 $^\circ E$ 表示

$$^\circ E = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-9)$$

相对黏度与运动黏度的换算关系为

$$\nu = \left(7.13^\circ E - \frac{6.13}{^\circ E} \right) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s} \quad (2-10)$$

2.4.4 黏度的主要影响因素

1. 温度

温度升高液体体积膨胀,液体质点间的间距加大,内聚力减小,在宏观上体现为液体黏度的降低。一般矿物油型液压油的黏温关系如下:

$$\nu = \nu_{40} \left(\frac{40}{\theta} \right)^n \quad (2-11)$$

式中, ν ——液压油在 $\theta^\circ\text{C}$ 时的运动黏度;

ν_{40} ——液压油在 40°C 时的运动黏度;

n ——指数,见表 2-5。

表 2-5 矿物油型液压油指数 n

$^\circ E_{40}$	1.27	1.77	2.23	2.65	4.46	6.38	8.33	10	11.75
$\nu_{40}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.4	9.3	14	18	33	48	63	76	89
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42