

高等学校教材

工程流体力学

王淑莲 编
李诗久 审

东北工学院出版社

内 容 简 介

本书共分八章。第一、二章(绪论、流体的主要物理性质)主要阐述流体的概念和物理性质;第三、四、五章(流体静力学、流体动力学基础、流体阻力计算)讲述流体平衡与运动规律,是本书的中心内容;第六章讲述流体通过孔口及缝隙的流动;第七章讲述液压冲击和空穴现象;第八章讲述相似原理和量纲分析。本书重点放在基本理论和概念的阐述及研究问题的基本方法上;注意反映现代工程技术中所涉及的流体力学理论和着重于实际应用。

本书可作为高等工业学校机械类各专业工程流体力学课程的教材,适合40学时左右讲授,也可作为有关工程技术人员自学的参考书。

工程流体力学

王淑莲 编 李诗久 审

东北工学院出版社出版发行 沈阳市第一印刷厂印刷
(沈阳·南湖) (辽新出许字89037号)

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.5 字数: 297千字
1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷
印数: 1~2000册

责任编辑: 董 平 责任校对: 铁 军
封面设计: 鄂承宗

ISBN 7-81006-265-4/TH·28 定价: 2.92元

前 言

《工程流体力学》一书是根据本课程40学时的教学大纲编写的，可作为高等工业学校机械类各专业工程流体力学课程的教材，适合40学时左右讲授，也可作为有关工程技术人员自学的参考书。

本书共分八章。第一、二章（绪论、流体的主要物理性质）主要阐述流体的概念和物理性质；第三、四、五章（流体静力学、流体动力学基础、流体阻力计算）讲述流体平衡与运动规律，是本课程的中心内容；第六章讲述流体通过孔口及缝隙的流动；第七章讲述液压冲击和空穴现象；第八章讲述相似原理和量纲分析。

本书在编写中力求反映如下特点：

1. 加强基本理论。重点放在基本理论和概念的阐述及研究问题的基本方法上，如能量方程、动量方程的推导分析及其应用以及S-N程方等。力求使学生了解进一步探索问题的途径，以便能用流体力学的基本理论来分析和解决工程技术中的实际问题。

2. 注意反映现代工程技术中所涉及的流体力学理论。如对含气液体的压缩性、管道动态特性、液压系统中的流体力学问题以及缝隙流动等，都作了比较详尽的分析和介绍。

3. 着重于应用。书中附有必要的图表数据、例题，每章的最后还附有思考题和计算题（有答案）。力求通过相当数量的例题启发和计算题求解，引导学以致用，做到理论与工程实际的结合。

4. 全书贯彻了法定计量单位，并介绍了不同单位的换算。

本书主审李诗久教授仔细审阅了原稿，对本书章节的设置

和一些具体内容都提出了宝贵的意见和进行了细致的修改。对此，编者深表谢意。

在本书编写过程中，得到了东北工学院、沈阳建筑工程学院、沈阳工业大学等院校的支持和一些同志的帮助，在此，编者一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，本书中一定会存在着缺点和错误，恳请读者批评指正。

王淑莲

一九八九年十月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1—1 工程流体力学及其在工程技术 上的作用.....	1
§ 1—2 流体的概念和连续介质模型.....	2
思考题.....	3
第二章 流体的主要物理性质	5
§ 2—1 关于单位制.....	5
§ 2—2 流体的密度、重度和比重.....	6
§ 2—3 液体的可压缩性和膨胀性.....	10
§ 2—4 流体的粘性.....	18
§ 2—5 液体的其他特性.....	30
思考题和计算题.....	33
第三章 流体静力学	37
§ 3—1 作用在流体上的力.....	37
§ 3—2 流体静压力及其特性.....	39
§ 3—3 流体平衡微分方程式.....	41
§ 3—4 流体静压力的分布规律.....	44
§ 3—5 压力的度量、单位和测量.....	46
§ 3—6 巴斯加压力传递原理.....	57
§ 3—7 流体作用在平面和曲面上的力.....	60
§ 3—8 液体的相对平衡.....	77
思考题和计算题.....	86
第四章 流体动力学基础	97
§ 4—1 流体流动的几个基本概念.....	97

§ 4—2	连续性方程式.....	107
§ 4—3	流体微团的运动分析.....	115
§ 4—4	理想流体的伯努利方程式.....	124
§ 4—5	粘性流体的运动微分方程式 (纳维-斯托克斯方程式).....	134
§ 4—6	实际流体的伯努利方程式.....	140
§ 4—7	伯努利方程式的应用.....	147
§ 4—8	动量方程式.....	156
§ 4—9	动量方程式的应用.....	161
	思考题和计算题.....	173
第五章	流体阻力计算	185
§ 5—1	流体的流动状态及雷诺判据.....	185
§ 5—2	圆管中的层流.....	194
§ 5—3	圆管中的紊流.....	204
§ 5—4	局部损失.....	220
§ 5—5	能量损失迭加原则.....	229
§ 5—6	管路计算.....	234
§ 5—7	管道动态特性.....	249
	思考题和计算题.....	257
第六章	流体通过孔口及缝隙的流动	266
§ 6—1	流体通过孔口的定常流动.....	266
§ 6—2	变水头下孔口的出流.....	282
§ 6—3	流体在平行平板缝隙中的流动.....	286
§ 6—4	平行圆盘缝隙中的层流.....	293
§ 6—5	环形缝隙中的流体流动.....	299
§ 6—6	流体在倾斜平板缝隙中的流动.....	303
	思考题和计算题.....	309
第七章	液压冲击和空穴现象	316
§ 7—1	液压冲击.....	316

§ 7—2 空穴现象	325
思考题和计算题	328
第八章 相似原理和量纲分析	331
§ 8—1 相似原理	331
§ 8—2 量纲分析法	343
思考题和计算题	351
参考文献	356

第一章 绪 论

§ 1—1 工程流体力学及其在工程技术上的作用

一、工程流体力学的定义

工程流体力学就是研究流体的平衡、运动及流体和物体相互作用的力学规律及其在工程技术上的应用的一门科学。它是力学的一个分支。

流体力学实际上包括液体力学和气体力学两部分。液体力学中通常以水做为液体的代表，故有时称为水力学。

古典流体力学研究问题的方法是在古典力学基础上，用理论方法，即运用严密的数学工具，建立有关理想流体及实际粘性流体的基本微分方程式，这种方法为流体力学的发展奠定了理论基础。但由于实际流体运动的复杂性，许多实际问题尚难以用数学方法来表达和解决。而水力学从着眼于实际问题，用一元流动的结论，来近似估算实际上是三元的运动。即认为运动参数只是沿某一座标轴变化，而对于垂直这个坐标轴的平面来说，取它的平均值(称为平均法)，并采用实验方法，取得实验数据和经验公式。

工程流体力学则是采取古典流体力学和水力学的研究方法，即以理论分析和实验研究相结合的方法来研究流体的力学规律。

二、工程流体力学在工程技术上的作用

工程流体力学在工程技术上有着重要的作用。机械工程中应用流体力学知识的技术问题很多。例如：机床中的润滑、冷却、通风、静压支承、动压支承、气动夹具、减震加载、制动；铸造中的浇注系统、水力清砂、通风除尘、冲天炉供风、

气力送砂等；焊接中的金属流动、喷枪气流以及测试计量中的有关仪器等问题的解决都依靠流体力学的理论。事实上，任何机械厂中都离不开油泵、水泵、水压机、油压机、气压机、风扇、通风机、压力表、流量计之类的元件和仪表以及车间中的液压自动线、机械手，尤其机械制造业与流体力学是密切相关的。例如，机床、工程机械、矿山机械、建材机械、汽车、拖拉机、飞机、船舶等广泛应用液压传动，特别是机床的进给、主运动、仿形、辅助、步进等应用液压传动装置更为广泛，采用液压的机床类别70%—80%以上，而德、日、美等国更为突出；还有象喷气发动机、涡轮增压器、螺旋桨等一些动力机械以及有关系统、管路、各种阀门中流体的计算都是利用流体的平衡和运动及与固体相互作用的规律来分析、计算和解决问题的，都分别涉及到流体静力学、流体动力学、能量损失等基本理论。尤其是伯努利(Benolli)方程、连续方程和动量方程这三个流体力学的基本方程要经常用到。可见，流体力学在工程技术中起着重要作用。因而工程流体力学，是机械类专业的一门重要的技术基础课。由于电子计算机的出现，使过去许多无法进行计算的课题，现在可以解决，使流体运动研究课题的内容日益丰富，并且派生出很多新的分支学科，如计算流体力学、等离子体动力学和电磁流体力学、随机水力学等。这些新学科的出现，将推动流体力学的进一步发展。

§ 1—2 流体的概念和连续介质模型

一、流体的概念

凡是流体，都具有流动的特性，不能保持其自身的形状，故可得流体定义为：“流体是一种受到任何微小剪切力的作用，都将产生连续变形的物体。”流体分为液体和气体两种，气体的分子间距离较大，受压力作用后体积改变较大，即气体的主要特点是有压缩性，工程上常称为可压缩流体。而液体分

子间距离较小，受压力作用后体积变化很小，工程上一般可忽略不计。因此工程上常称之为不可压缩的流体。但在某些特殊情况下，例如在液压系统中压力变化较大（可达几十甚至几百个大气压）的有些问题的分析中，液压油的压缩性就成为影响因素而不能忽略了。由于气体和液体的很多规律是类似的，因此我们这门课程中主要以液体为讨论对象。

二、连续介质模型

从分子物理学观点看来，流体是由大量的作不规则运动分子组成的。分子间总是存在间隙的，因此它们是不连续的。但是，流体力学是研究宏观流体的机械运动，从工程技术的观点看来，分子的间隙是极其微小的，完全可以把流体看成是连续介质。关于连续介质模型的定义是：流体是由无限多个连续分布的流体质点组成的，质点间相对间隙足够小，可以看成质点间没有间隙，质点(dV_0)本身的尺寸相对流动空间的尺寸来说是足够小，而可以忽略不计；质点相对于分子距来说是足够大，即质点中包含了大量分子。则质点的运动参数为大量分子作用、行为的统计平均值。连续介质的假设在工程上是完全可行的。例如，在标准状态下，一立方毫米的气体中有 2.7×10^{16} 个分子，一立方毫米的液体中有 3×10^{21} 个分子。如取一立方微米(dV_0)为质点体积，它比工程管道的流动空间是足够小，而其中包含有(3×10^{21} 个水分子)大量分子，而足够确定其统计平均效应。

在研究连续介质时，则反映流体质点的各种物理量（如速度、密度、压力等）都是空间坐标的连续函数，便可应用连续函数理论为数学工具，每个流体质点看作是一个数学点，用数学解析方法来分析研究流体力学问题。本书中有关描述和分析，都是在连续介质假设下进行的。

思 考 题

【思 1—1】 流体的定义是什么？液体与气体有哪些共性

与区别？

〔思 1—2〕 什么叫连续介质？为什么把流体看成连续介质？

第二章 流体的主要物理性质

流体本身的物理性质是决定流体平衡和运动规律的内在原因。因此，要了解流体运动的规律，须首先研究流体的物理性质。当然，流体的物理性质很多，在这里，我们只能讨论与工程流体力学有关的几个最主要的物理性质。

§ 2—1 关于单位制

在研究流体物理性质时必然涉及到许多物理量的单位，因为任何物理量的大小都必须用一个单位来衡量，因此就有一个度量单位的问题。度量单位有两种：一种是基本单位，一种是导出单位。工程上涉及的量很多，但在工程流体力学中，只要确定三个基本量：长度（米，m）、质量（千克，kg）、时间（秒，s）就可以按照一定的物理关系式推导出其它有关物理量。基本量的单位叫基本单位，导出量的单位叫做导出单位。基本单位和导出单位的总和称为单位制。目前的单位制有米制和国际单位制两种。米制中有CGS制、MKS制和工程单位制（重力制——MKfS制）三种。CGS和MKS两种单位制又叫绝对单位制。国际单位制(SI)与MKS制相一致。

本书采用国际单位制。为了便于分清各种单位制及其换算，可参阅表2—1及表2—2。国际单位制的单位是牛顿。即选取1 kg质量的物体能获得 1m/s^2 加速度的力作为它的单位尺寸，命名为牛顿，用符号N表示，即

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot 1\text{m/s}^2 = 100\text{kg} \cdot \text{cm/s}^2 \quad (2-1)$$

$$\therefore 1\text{kgf} = 9.81\text{N}$$

国际单位制中压强用 N/m^2 为单位称为帕斯卡，因这个单位量值太小，使用不便，故采用单位巴(bar)为压强单位。

表2—1

不同单位制的基本单位

物理量名称	基 本 单 位			
	CGS制	MKS制	MKfS制	SI制
长 度	厘米(cm)	米(m)	米(m)	米(m)
质 量	克(g)	千克(kg)	—	千克(kg)
力	—	—	公斤力(kgf)	—
时 间	秒(s)	秒(s)	秒(s)	秒(s)

$1\text{bar} = 10^5\text{N/m}^2 = 10^6\text{Pa} = 10\text{N/cm}^2 = 1000\text{kg/cm}\cdot\text{s}^2$
(2—2)

它与工程制关系为

$1\text{bar} = 1.02\text{kgf/cm}^2$

$1\text{kgf/cm}^2 = 0.98\text{bar}$

§ 2—2 流体的密度、重度和比重

一、密度

在流体内任意点处取微小质量 ΔM 与其体积 ΔV 之比的极限值,称为该点流体的密度,以“ ρ ”表示。

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}$$
 (2—3)

对均质流体

$$\rho = \frac{M}{V}$$
 (2—4)

M ——流体的质量;

V ——流体的体积。

在国际制(SI)中 ρ 的单位为 kg/m^3 。

水在1个大气压力下,4℃时 ρ 值最大,为 1000kg/m^3 取为计算值;油的 ρ 值范围是 $850\sim 960\text{kg/m}^3$ 。

表 2-2 不同单位制的单位换算

物理量名称	SI制		MKS制		CGS制		MKS制		换算关系 国际单位=绝对单位 =工程单位
	名称	符号	名称	符号	名称	符号	名称	符号	
长度 L	米	m	米	m	厘米	cm	米	m	1m=100cm=1m
质量 M	千克(公斤)	kg	千克(公斤)	kg	克	g	公斤力·秒 ² /米	kgf·s ² /m	1kg=10 ³ g= $\frac{1}{9.81}$ kgf·s ² /m
时间 T	秒	s	秒	s	秒	s	秒	s	1S=1S=1S
力 F	牛顿	N	牛顿	N	达因	dyne	公斤力	kgf	1N=10 ⁵ dyne= $\frac{1}{9.81}$ kgf
压力 p	帕斯卡	P _a =N/m ²	帕斯卡	P _a =N/m ²	达因/厘米 ²	dyne/cm ²	公斤力/米 ²	kgf/m ²	1P _a =10dyne/cm ² = $\frac{1}{9.81}$ kgf/m ²
密度 ρ	千克/米 ³	kg/m ³	公斤/米 ³	kg/m ³	克/厘米 ³	g/cm ³	公斤力·秒 ² /米 ⁴	kgf·s ² /m ⁴	1kg/m ³ =10 ⁻³ g/cm ³ =9.81kgf·s ² /m ⁴
重度 γ	牛/米 ³	N/m ³	公斤/米 ³	kgf/m ³	达因/厘米 ³	dyne/cm ³	公斤力/米 ³	kgf/m ³	1N/m ³ =10 ⁻¹ dyne/cm ³ $\frac{1}{9.81}$ kgf/m ³
动力粘度 μ	$\frac{\text{牛顿} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$ =帕·秒 = $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$ =Pa·s	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$ =Pa·s	$\frac{\text{牛顿} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$ =帕·秒 =Pa·s	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$ =Pa·s	达因·秒 厘米 =泊 =P	dyne·s/cm ² =P	$\frac{\text{公斤力} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$ kgf·s/m ²	kgf·s/m ²	1Pa·s=10P= $\frac{1}{9.81}$ kgf·s/m ²
运动粘度 ν	米 ² /秒	m ² /s	米 ² /秒	m ² /s	厘米 ² /秒 =斯托克斯 =st	cm ² /秒 =st	米 ² /秒	m ² /s	1m ² /s=10 ⁴ st=1m ² /s
功 W	焦耳 =牛·米	J=N·m	焦耳	J=N·m	尔格 =达因·厘米 =erg	dyne·cm =erg	公斤力米	kgf·m	1J=1N·m=10 ⁷ dyne·cm = $\frac{1}{9.81}$ kgf·m
功率 N	瓦=焦/秒	w=J/s	瓦	w=J/s	尔格/秒	erg/s	公斤力·米/秒	kgf·m/s	1w=J/s=10 ⁷ dyne·cm/s = $\frac{1}{9.81}$ kgf·m/s

在热力学和气体动力学中, 气体体积的度量, 常用比容 v 来表示, 即流体内任意点微小体积 ΔV 与其质量 ΔM 之比的极限值。则

$$v = \lim_{\Delta M \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta M} = \frac{1}{\rho} \quad (2-5)$$

对均质流体

$$v = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho} \quad (2-6)$$

由上面看出比容与密度互为倒数, 故在国际制 (SI) 中 v 的单位为 m^3/kg 。

二、重度

在流体内任意点处取微小重量 ΔF_G 与其体积 ΔV 之比的极限值, 称为该点流体的重度, 以 γ 表示。

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_G}{\Delta V} \quad (2-7)$$

对均质流体

$$\gamma = \frac{F_G}{V} \quad (2-8)$$

F_G ——流体的重量;

V ——流体的体积。

在国际制 (SI) 中 γ 的单位为 N/m^3 。

由于 $F_G = Mg$, 所以密度与重度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (2-9)$$

重力加速度 g 的值在 SI 制中为 $9.80665 \text{m}/\text{s}^2$, 而工程上通常取 $9.81 \text{m}/\text{s}^2$ 。

水的重度通常采用的数值为 $9800 \text{N}/\text{m}^3$; 在 15°C 时液压油的密度可取为 $900 \text{kg}/\text{m}^3$, 重度可取为 $8.8 \times 10^3 \text{N}/\text{m}^3$ 。

例2-1 20*机油, 测其体积为 576cm^3 , 其质量为 0.52kg 。(1) 试求以国际单位制表示该油密度和重度各为多少? 并

换算出CGS制和MKfS制密度和重度。(2) 推导出一般关系:

$$1\text{N}/\text{m}^3 = 10^{-1}\text{dyne}/\text{cm}^3 = \frac{1}{9.81}\text{kgf}/\text{m}^3。$$

解: (1) 因该油为均质, 故质量 $M = 0.52\text{kg}$, 体积 $V = 576 \times 10^{-6}\text{m}^3$, 故SI制的

$$\text{密度} \quad \rho = \frac{M}{V} = \frac{0.52}{576 \times 10^{-6}} = 903\text{kg}/\text{m}^3$$

$$\text{重度} \quad \gamma = \rho \cdot g = 903 \times 9.81 = 8858\text{N}/\text{m}^3$$

根据表2—2换算关系, 可换算出:

$$\text{CGS制密度,} \quad \rho_{\text{绝}} = 10^{-3}\rho = 0.903\text{g}/\text{cm}^3$$

$$\gamma_{\text{绝}} = 10^{-1}\gamma = 885.8\text{dyne}/\text{cm}^3$$

$$\text{MKfS制密度} \quad \rho_{\text{工}} = \frac{1}{9.81}\rho = 92\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

$$\text{重度} \quad \gamma_{\text{工}} = \frac{1}{9.81}\gamma = 902\text{kgf}/\text{m}^3$$

(2) 因为 $1\text{N} = 10^5\text{dyne}$, $1\text{m}^3 = 10^6\text{cm}^3$, 所以 $1\text{N}/\text{m}^3 = 10^{-1}\text{dyne}/\text{cm}^3$, 因为 $1\text{kgf} = 9.81\text{N}$, 故 $1\text{N}/\text{m}^3 = \frac{1}{9.81}\text{kgf}/\text{m}^3$

$$\text{则} \quad 1\text{N}/\text{m}^3 = 10^{-1}\text{dyne}/\text{cm}^3 = \frac{1}{9.81}\text{kgf}/\text{m}^3$$

三、比重

比重是物体的重量与温度4℃时同体积蒸馏水的重量之比, 因此, 比重是没有量纲的。比重的符号以 δ 表示, 若用下标W (water) 代表4℃蒸馏水物理量, 则

$$\delta = \frac{F_G}{(F_G)_W} = \frac{M}{(M)_W} = \frac{\rho}{\rho_W} = \frac{\gamma}{\gamma_W} \quad (2-10)$$

流体的密度或重度, 都随压力和温度而变化, 一般情况下随压力增大而加大, 随温度升高而减小。因通常使用的温度和压力变化范围很小, 所以在一般计算中, 可以近似地看作为常

数。表2—3列出在标准大气压力下各种常用液体的物理性质有关数值。

§ 2—3 液体的可压缩性和膨胀性

一、可压缩性

液体具有可压缩性。液体受压后体积缩小的性质叫可压缩性。压缩性的大小，可用体积压缩系数 β_v 来表示。体积压缩系数的定义为：流体体积在单位压力变化下的相对变化量，即

$$\beta_v = - \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} = - \frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (2-11)$$

式中 ΔV ——流体受压力作用后体积的变化值；

Δp ——流体的压力变化值；

V ——流体的初始体积；

β_v 的单位常用 m^2/N 表示。

因 ΔV 与 Δp 总是呈现相反变化，而存在着负值，故上式右边加上一个负号使 β_v 为正。

液体体积压缩系数的倒数，称为液体的体积弹性模量，用符号 K 表示，即

$$K = \frac{1}{\beta_v} = - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} = - \frac{\Delta p V}{\Delta V} \quad (2-12)$$

式中 K ——液体的体积弹性模量，单位同压强为 $\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$ ；

其它符号意义同前。

液压油的 K 值为 $1.4 \times 10^9 \sim 2.0 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ ，水的 K 值为 $2.10 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ ，而钢的 K 值为 $2.06 \times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$ ，可见前二者比后者压缩性大100~150倍。

1. 液体的体积弹性模量 K 与温度和压力的关系

温度升高时， K 值减小，在液压油正常工作的温度范围