

# 工程流体力学水力学题解

谢永曜 汝树勋 编译  
陈亚梅 王贤敏

四川科学技术出版社

## 工程流体力学水力学题解

---

四川科学技术出版社出版 (成都盐道街三号)  
新华书店重庆发行所发行  
重 庆 印 制 一 厂 印 刷

---

开本 850×1168毫米 1/32 印张22.75 插页4 字数566千  
1984年8月第1版 1984年8月第一次印刷  
印数: 1—11,460册

---

书号: 15298·11

定价: 3.85 元

# 前 言

《工程流体力学》、《水力学》是理工科高等院校许多专业的主要技术基础课。为帮助读者学好这门课程，巩固和加深对基本概念、基本原理的理解及应用，并配合近期出版的几种工程流体力学和水力学试用教材，特编译成本书。

本书内容约一半左右取材于道格拉斯著《流体力学题解》(John F. Douglas; Solution of Problems in Fluid Mechanics, Part One, Part Two); 其余取材于编者教学实践中积累的资料及国内外有关教材。

为便于读者自学，本书在每章的开始都简要地介绍了有关的主要概念、主要公式及解题思路。在解题过程中，特别注意从物理的基本原理出发，通过分析、讨论求得解答；叙述力求简明扼要，尽量避免照套公式的作法；希望对读者独立分析、解决问题的能力有所裨益。

在取材的深度、广度上，本书考虑了不同专业的要求，并尽可能结合工程实际，以便读者有一定选择余地。

本书全部采用国际单位制。

本书由成都科技大学汝树勋(9、14、15、16章)和四川工业学院谢永曜(1、3、4、5、6、10、11、12、22、23、24章)、陈亚梅(2、7、8、13、19、20、21章)、王贤敏(17、18、25、

26、27、28、29、30、31章) 共同编写。全书由谢永曜、汝树勋  
审校。

限于编者业务水平, 书中难免存在缺点、错误, 诚恳希望广  
大读者批评、指正。

编者 1982年6月

## 目 录

第一章	绪论	1
第二章	静止流体的压强和压力	23
第三章	浮力与浮体的稳定性	60
第四章	液体的相对静止	81
第五章	液流的基本方程	96
第六章	射流的作用力	120
第七章	流动型态——层流和紊流	138
第八章	管流的能头损失	173
第九章	有压管中的恒定流	203
第十章	流速与流量测量	225
第十一章	孔口、管嘴出流	246
第十二章	堰流	265
第十三章	明渠均匀流	285
第十四章	明渠恒定非均匀流	301
第十五章	水跃	324
第十六章	变液位下的出流	338
第十七章	间隙流动	356
第十八章	液体润滑支承	379
第十九章	水击	402

第二十章	静态气体	440
第二十一章	气体一元稳定流动	452
第二十二章	有旋流动	473
第二十三章	平面有势流动	497
第二十四章	附面层	523
第二十五章	因次分析	544
第二十六章	流体动力相似	569
第二十七章	水库	595
第二十八章	冲击式与反击式水轮机	619
第二十九章	离心泵与风机	645
第三十章	往复泵	675
第三十一章	液压机械	696

# 第一章 绪 论

工程流体力学是应用力学的一部分，既研究液体，也研究气体，其内容包括流体静力学、运动学和动力学。这里所说的流体通常指的是“牛顿流体”。在工程流体力学中所用到的速度、力、动量和能量等概念与一般力学中所遇到的并无两样，但在流体力学中往往是讨论流体的流动，而不象固体力学中讨论的是物体的运动。

固体既能抵抗法向力——压力与拉力，也能抵抗切向力。而流体仅能抵抗压力，不能承受拉力，抵抗拉伸变形；又，即使在微小的切向力作用下，也很容易变形或流动，故流体不能保持一定的形状。由于流体的形状改变是由切向力引起的，因此，有切向力作用，流体就要流动。反过来说，若流体处于静止状态，就无切应力作用在流体上，所有作用在流体上的力将垂直于作用平面。

液体与流体都属于流体。但两者有所不同：液体不容易压缩，一定质量的液体总是占有一定的体积，并在与空气接触的面上形成“自由表面”，作为液体与其上面的空气的分界面。气体却很容易压缩，也很容易膨胀，它总会膨胀到占据容器的整个空间，没有自由表面。

固体与流体的区别在于：（1）在弹性限度之内，固体形状的变化是遵循应变与所作用的应力成正比之规律；对于流体，则是应变率与应力成正比。（2）固体的应变与力作用的时间无关，只要未超过弹性极限，当应力去除时，形变也消失；对于流体，只

要有应力作用，它将继续流动，当应力去除时，它不能恢复到原先的形状。

以下对流体的特性及流体力学中所采用的单位作一介绍。

## 一、国际单位制

1956年国际度量衡局制定了新单位制，命名为国际单位制 (Système International d'Unités)，规定用“SI”为其国际符号。1977年我国国务院及教育部已先后指示应在教材中逐步采用国际单位制，所以本书采用国际单位制。国际单位制7个基本单位，见表1-1。

其它物理量的单位均可由以上这7个基本单位导出，称为导出单位。这是因为国际单位制是一种相参单位制，其它量的单位

表1-1 国际单位制的基本单位

长度单位	米	m
质量单位	千克 (公斤)	kg
时间单位	秒	s
热力学温度单位	开尔文	K
电流单位	安培	A
光强度单位	坎德拉	cd
物理量单位	摩尔	mol

都可以通过基本单位的组合来表示。例如，距离的单位（米）除以时间的单位（秒）就得速度的单位 $\left(\frac{\text{米}}{\text{秒}}\right)$ 。又如，力与质量之间的单位关系，可按牛顿第二定律 $F=ma$ 导出，因而，力的单位应



由质量的单位（公斤）和加速度单位 $\left(\frac{\text{米}}{\text{秒}^2}\right)$ 的乘积 $\left(\frac{\text{公斤}\cdot\text{米}}{\text{秒}^2}\right)$ 来表示，称之为牛顿。

在应用SI单位制时，在不同的科技领域内，有可能对同一物理量所使用的单位尺度相差万千倍，因而允许有些单位在规定的基礎上再增加倍单位和分单位。采用在主单位的符号前加上冠词，组成分单位或倍单位的符号。例如，“mm”表示 $10^{-3}$ 米，即毫米。SI制的词冠列于表1-2。

除国际单位制外，还有一些单位制过去曾使用过，有的在某些地区、某些场合还会继续使用一段时期。常见的有：英美的呎-磅-秒制（f-p-s制）、物理上用的厘米-克-秒制（cm-g-s制）以及工程技术上采用的米-千克（公斤力）-秒制（M-K-S制）。表1-3列出了SI制中常用的流体力学单位，表1-4列出了一些常用单位

表1-2 SI词冠

因数	词 冠	代 号		因数	词 冠	代 号	
		国际	中 文			国际	中 文
$10^{18}$	艾克萨(exa)	E	艾	$10^{-1}$	分 (deci)	d	分
$10^{15}$	拍它 (peta)	P	拍	$10^{-2}$	厘 (centi)	c	厘
$10^{12}$	太拉 (tera)	T	太	$10^{-3}$	毫 (milli)	m	毫
$10^9$	吉咖 (giga)	G	吉(千兆)	$10^{-6}$	微 (micro)	$\mu$	微
$10^6$	兆 (mega)	M	兆	$10^{-9}$	纳诺 (nano)	n	纳(毫微)
$10^3$	千 (kilo)	K	千	$10^{-12}$	皮可 (pico)	p	皮(微微)
$10^2$	百 (hecto)	h	百	$10^{-15}$	飞母托(femto)	f	飞
$10^1$	十 (deca)	da	十	$10^{-18}$	阿托 (atto)	a	阿

表1-3 常用的流体力学单位 (SI制)

量	符号	类别	单位名称	SI		用基本单位表示
				中文代号	国际代号	
长度	L	基 本 单 位	米	米	m	m
质量	m		千克 (公斤)	千克(公斤)	kg	kg
时间	t		秒	秒	s	s
热力学温度	T		开尔文	开	K	K
角度	$\theta$		弧度	弧度	rad	
力	F		牛顿	牛	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压强	p		帕斯卡 (=牛/米 <sup>2</sup> )	帕	P <sub>a</sub>	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
切应力	$\tau$		牛顿每平方米	牛/米 <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面张力	$\sigma$		牛顿每米	牛/米	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
力矩	M		牛顿米	牛·米	N·m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
动量	mv	牛顿米每秒	牛·米/秒	N·m/s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$	
动力粘性系数	$\mu$	帕秒 (= $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$ )	帕·秒	P <sub>a</sub> ·s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	
运动粘性系数	$\nu$	平方米每秒	米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	

续表

量	符号	类别	单位名称	SI		用基本单位 表示
				中文代号	国际代号	
密度	$\rho$	导出单位	公斤每立方米	公斤/米 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ·kg
重度	$\gamma$		牛顿每立方米	牛/米 <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>	m <sup>-2</sup> kg·s <sup>-2</sup>
功(能)	W		焦耳(=牛·米)	焦	J	m <sup>2</sup> ·kg·s <sup>-2</sup>
功率	P		瓦特(=焦/秒)	瓦	W	m <sup>3</sup> ·kg·s <sup>-3</sup>
比能	e, h		米	米	m	m
面积	A, S		米平方	米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
体积	V		米立方	米 <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
速度	v		米每秒	米/秒	m/s	m·s <sup>-1</sup>
角速度	$\omega$		弧度每秒	弧度/秒	rad/s	s <sup>-1</sup>
加速度	a		米每秒平方	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m·s <sup>-2</sup>
流量	Q	立方米每秒	米 <sup>3</sup> /秒	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	
环量	$\Gamma$	平方米每秒	米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	

表1-4 一些常用的单位换算成SI制的单位

量	单位名称	代号	折合成SI制	量	单位名称	代号	折合成SI制
长度	呎	ft	0.3048米	压 强	毫巴	mbar	10 <sup>2</sup> 帕斯卡
	吋	in	0.0254米		工程 大气压	$\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	9.80665帕斯卡
容积 面积	立方呎	ft <sup>3</sup>	0.028317米 <sup>3</sup>		标准 大气压	atm.	1.01325 帕斯卡
	平方呎	ft <sup>2</sup>	0.092903米 <sup>2</sup>		托	Torr	133.322帕斯卡
质量	磅	lb	0.4536千克 (公斤)		毫米汞柱	mmHg	133.322帕斯卡
	每分转数	rpm	$\frac{\pi \text{ (弧度)}}{30 \text{ 秒}}$		毫米水柱	mmH <sub>2</sub> O	9.80665帕斯卡
角速度	每秒转数	rps	$2\pi \frac{\text{ (弧度)}}{\text{秒}}$		千克力每 平方毫米	$\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$	9.80665×10 <sup>6</sup> 帕斯卡
	流量	立方呎 每秒	$\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$		马力小时 (英制)	Hp·h	2.685×10 <sup>6</sup> 焦耳
力	达因	dyn	10 <sup>-5</sup> 牛顿		马力小时 (米制)	Hp·h	2.648×10 <sup>6</sup> 焦耳
	千克力 (公斤力)	kgf	9.80665牛顿		瓦特· 小时	W·h	3600焦耳
	吨力	tf	9806.65牛顿	千克力米	kgf·m	9.80665焦耳	
	力矩	千克力· 米	kgf·m	马 力 (英制)	Hp	745.7瓦特	
粘 度	泊	p	$1 \frac{\text{达·秒}}{\text{厘米}^2}$ (=0.1帕·秒)	功 率	马 力 (米制)	Hp	735.499瓦特 (=75 千克力米 秒)
	斯托克斯	s	10 <sup>-4</sup> $\frac{\text{米}^2}{\text{秒}}$				
	巴	bar	10 <sup>5</sup> 帕斯卡				

折合为国际单位的换算关系，与国际单位制并用的单位列表于1-5；过去常用的几种单位制的基本单位列表于表1-6。这些单位制中往往有两种形式：绝对单位制——以质量单位为基本单位，力的单位是导出单位；工程单位制——以力单位为基本单位，质量的单位是导出单位。力与质量的单位之间仍由牛顿第二定律相联系。至于 M-K-S 中的绝对单位制，就力学上所遇到的而论，是与SI制一致的。1公斤的力 (kgf) 定义为：45° 纬度的海平面上（重力加速度  $g=9.80665\text{m/s}^2$ ）在真空中国际千克原器所受到的重力。在SI制中，力是导出单位，选取使 1kg 的质量的物体能获得  $1\text{m/s}^2$  的加速度的力作为它的单位尺度，称为牛顿 (N)，即  $1\text{N}=1\text{kg}\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ 。按上述条件，国际千克原器在 45° 纬度的真空中将受到  $9.80665\text{N}\approx 9.81\text{N}$  的重力，由此得出：

表1-5 与国际单位制并用的单位

量	单位名称	代号	折合成SI制
时 间	分	min	=60秒
	时	h	=3600秒
	日	d	=86400秒
平面角	度	°	$=\frac{\pi}{180}$ 弧度
	分	'	$=\left(\frac{1}{60}\right)^\circ = \frac{\pi}{10800}$ 弧度
	秒	"	$=\left(\frac{1}{60}\right)' = \frac{\pi}{64800}$ 弧度
体积 (容积)	升	l	=1分米 <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> 米 <sup>3</sup>
质 量	吨	t	=10 <sup>3</sup> 千克 (公斤)

表1-6 各种单位制的基本单位

物理量	呎-磅-秒制 (f-p-s)		厘米-克-秒制 (c-g-s)		M-K-S	SI
	绝对	工程	绝对	工程		
长度	呎(ft)	呎(ft)	厘米(cm)	厘米(cm)	米(m)	米(m)
时间	秒(s)	秒(s)	秒(s)	秒(s)	秒(s)	秒(s)
质量	磅(lb)	/	克(g)	/	/	千克(公斤)(kg)
力	/	磅(lb)	/	克(g)	公斤力(kgf)	/

表1-7 压强单位换算

工程大气压 ata	标准大气压 atm	巴 bar	国际单位制 $P_a \left( = \frac{N}{m^2} \right)$	工程单位制 $\frac{kgf}{cm^2}$	英制 $\frac{lb}{in^2}$	毫米汞柱 mm(Hg)	米水柱 m(H <sub>2</sub> O)
1.033	1	1.013	$1.013 \times 10^5$	1.033	14.69	760.0	10.33
1.019	0.987	1	$10^5$	1.019	14.50	749.3	10.19
$1.019 \times 10^{-5}$	$0.987 \times 10^{-5}$	$10^{-5}$	1	$1.019 \times 10^{-5}$	$14.50 \times 10^{-5}$	$7.493 \times 10^{-3}$	$10.19 \times 10^{-5}$
1	0.968	0.981	$0.981 \times 10^5$	1	14.22	735.6	10
0.070	0.068	0.069	6860	0.070	1	51.71	0.703
$0.136 \times 10^{-2}$	$0.132 \times 10^{-2}$	$0.133 \times 10^{-2}$	132.7	$0.136 \times 10^{-2}$	$0.193 \times 10^{-1}$	1	$0.136 \times 10^{-1}$
0.100	$0.968 \times 10^{-1}$	$0.981 \times 10^{-1}$	$0.981 \times 10^4$	0.100	1.422	73.56	1

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

另外，压强是流体力学中常用的单位，在SI制中，压强用 $\text{N}/\text{m}^2$ 为单位称为帕斯卡，因其量值太小，实用上有时用其它压强单位来表示，常用的还有：米水柱、毫米汞柱、标准大气压、工程大气压、公斤力/米<sup>2</sup>、磅力/吋<sup>2</sup>以及巴等。表1-7列出这些压强单位的换算值。

在目前SI制还没有完全代替其它单位制的情况下，尤应注意各种单位制之间的换算。本书中的题解，其单位一概以SI制表示。

## 二、因次方程

力学中所有的物理量的因次，均可以用质量M、长度L和时间T这三个基本因次的组合来表示，M、L和T是国际单位制的基本因次。

把一个物理现象或过程用方程来描述时，方程的因次必须是齐次的，也就是说，方程中各项的因次应该相同，并且各项的单位也应该相同。因此，解题时务必检查一下所立的方程中各项因次是否相同，单位是否统一。假若方程中各项的因次不同，单位不一，那么你会发觉，也许漏了某个物理量，也许在推导中把有些项放错了位置，或者不是采用同一种单位制，或者出现其它差错。但要注意工程流体力学中有些经验式、半经验式在外观上其因次不是齐次的，如过流宽为B、堰上水头为H的矩形堰的流量 $Q=1.79BH^{3/2}$ ，左边的因次是 $L^3T^{-1}$ ，而右边的因次是 $L^{5/2}$ 。原因是系数1.79并非纯数，在SI制中它应是 $0.57\sqrt{g}$ ，此系数具有 $L^{1/2}T^{-1}$ 的因次。这样，上式中的因次左右都是 $L^3T^{-1}$ ，实际上仍然是齐次的。所以说：方程中各项的因次必须相同，方程中

同一种物理量的单位必须统一。

利用因次关系，可求得同一物理量以不同单位制所表示的单位之间的换算因子。例如：温度为95°F时水的动力粘性系数 $\mu$ 值以c-g-s绝对制表示为 $7.2 \times 10^{-8}$ 泊，问若用SI制表示应是多少帕·秒？

$$\begin{aligned} [\mu] &= ML^{-1}T^{-1} \\ \frac{[\mu]_{SI}}{[\mu]_{cgs}} &= \frac{(ML^{-1}T^{-1})_{SI}}{(ML^{-1}T^{-1})_{cgs}} = \frac{(M)_{SI}(L)_{cgs}(T)_{cgs}}{(M)_{cgs}(L)_{SI}(T)_{SI}} \\ &= \frac{1000 \cdot 1 \cdot 1}{1 \cdot 100 \cdot 1} = 10 \end{aligned}$$

于是

$$[\mu]_{cgs} = \frac{1}{10} [\mu]_{SI}$$

这就是说，动力粘性系数的数值若用SI制表示时，其值应是用c-g-s制表示数值的 $\frac{1}{10}$ 。所以，95°F的水的动力粘性系数用SI制表示应是 $7.2 \times 10^{-8} \times \frac{1}{10} = 7.2 \times 10^{-4}$ 帕·秒。

### 三、流体的特性

#### 1. 密度

必须区分流体密度的三种表示法：

##### (1) 质量密度

是单位体积的流体质量，简称密度，用希腊字母 $\rho$ 表示。在SI制中，其单位是 $kg/m^3$ 。

##### (2) 重度



是单位体积的流体重量，又称重量密度，用希腊字母 $\gamma$ 表示。在SI制中，其单位是 $N/m^3$ 。

### (3) 比重

表示流体的重量和同体积的温度为 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 的水的重量之比，也称为相对密度，用 $S$ 来表示。它是一个数字，没有单位。

显然，密度、重度和比重这三者之间有如下关系：

$$\gamma = \rho \cdot g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g}$$

$$S = \frac{\gamma}{(\gamma_w)_{4^\circ\text{C}}} \quad \text{或} \quad \gamma = (\gamma_w)_{4^\circ\text{C}} \cdot S$$

表1—8列出了水、空气和水银这三种最常用流体在标准大气压下不同温度时的密度。表1—9列出了几种常用流体的密度和重度。

表1-8 不同温度下的水、空气和水银的密度( $kg/m^3$ )

流体密度	温 度 ( $^\circ\text{C}$ )							
	0	4	10	20	40	60	80	100
水	999.87	1000	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	13600		13570	13550	13500	13450	13400	13350

在工程估算中，一般认为在常温（指 $0\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ ）、常压（指一个标准大气压左右）下，水的密度取 $1000kg/m^3$ ，重度取 $9810\text{ }N/m^3$ ，空气的密度取 $1.25kg/m^3$ ，水银的比重取 $13.6$ 。这是几个常用的数字，应当记住。

## 2. 粘性

流体在静止时不能抵抗剪切变形，但当运动时，就具有抵抗