

# 水力学及水力机械

江 宏 俊 編 著

中国工业出版社

# 水力学及水力机械

江 宏 俊 编 著

中国工业出版社

本书共分两部分：第一部分水力学；第二部分水力机械。内容包括了水静力学、水动力学及流体动力学的原理以及这些原理在工程上的实际应用；在水力机械方面包括了水泵及水轮机的原理及构造。

本书可作为高等工业学校机械制造类专业教学参考书之用；也可供生产部门有关工程技术人员参考之用。

## 水力学及水力机械

江宏俊 編著

\*

机械工业图书编辑部編輯 (北京阜成門外百万庄)

中国工业出版社出版 (北京东朝陽路丙10号)

北京市书刊出版业營業許可証出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

\*

开本  $850 \times 1168^{1/32}$  · 印张  $10^{15/16}$  · 字数 267,000

1962年5月北京第一版·1964年9月北京第二次印刷

印数 4,191—5,740 · 定价 (科七) 1.85元

\*

統一书号: 15165·1558 (一机-295)

## 序 言

本书可作为高等工业学校动力机械制造、机械制造及运输起重机械等各专业“水力学及水力机械”课程的教学参考书。本书分为两篇：第一篇是水力学，第二篇是水力机械。在水力学中叙述了水静力学、水动力学和流体动力学的各种原理以及这些原理在工程上的实际应用。由于本书的目的主要是供机械制造各专业用的，所以在编写时注意了对水力学的各种原理在机械方面的应用的叙述。在水力机械中叙述了水泵及水轮机的理论及结构。考虑到水泵是任何工厂及企业中所不可缺少的设备，而水轮机对一般机械制造专业的关系不大，所以编写这一部分时，对各种水泵的工作原理、特性及构造叙述得比较详细，而对水轮机只作一般性的叙述。

本书内容方面流体力学概论一章，是考虑到近代科学技术的发展有许多问题要牵涉到流体力学及气体力学，而这一章是为进一步学习这方面知识的基础。如各专业如采用本书作为教科书时，则应根据专业的要求，将内容加以必要的增减或按本书内容讲授。

编写本书过程中，编者曾参考了一些有关水力学、流体力学及水力机械的书籍，在内容方面有一些是根据编者的理解及意见加以叙述，但由于编者能力有限，难免有不妥或不正确之处，对本书内容及其他方面，希望读者提供宝贵意见，以便今后加以修正。

西安交通大学动力系流体力学教研组及水利系水力学教研组许多同志对本书内容提供宝贵意见，其中刘光宗、吴达人及费祥麟三位同志分别参加本书各章例题的编写工作，对此编者深表谢意。

# 目 录

## 序言

## 第一篇 水力学

緒論	9
第一章 流体及其主要的物理性质。作用于液体中的力	11
1-1 流体	11
1-2 重度、比重及密度	12
1-3 流体的膨胀及压缩性	13
1-4 毛细管现象	15
1-5 流体的粘性	16
1-6 实际流体和理想流体	19
1-7 作用于液体中的力	20
第二章 水静力学	21
2-1 水静力学所研究的问题	21
2-2 水静压力及其特性	21
2-3 液体平衡的微分方程式	25
2-4 液体平衡微分方程式的积分	26
2-5 等压面	27
2-6 计示压力、真空	33
2-7 水静能头, 计示能头, 比势能	34
2-8 巴斯加定律	36
2-9 压力计	38
2-10 作用在平面上的总压力	45
2-11 作用在曲面上的总压力	50
2-12 物体在液体中的平衡	56
第三章 水动力学原理	60
3-1 水动力学研究的问题及目的	60
3-2 稳定流动与不稳定流动	60

3-3 流綫、流管与微小流束 .....	62
3-4 有效断面与流量 .....	63
3-5 理想液体的运动微分方程式 .....	64
3-6 連續性微分方程式 .....	65
3-7 欧拉方程式的积分——伯努利方程式 .....	67
3-8 伯努利方程式的意义 .....	69
3-9 实际液体微小流束的伯努利方程式 .....	71
3-10 緩变流动 .....	73
3-11 平均流速，流量不变方程式 .....	75
3-12 实际液体全部液流的伯努利方程式 .....	77
3-13 伯努利方程式的应用 .....	80
<b>第四章 通道中的摩擦阻力</b> .....	<b>86</b>
4-1 均匀流动与不均匀流动 .....	87
4-2 均匀流动的基本方程式 .....	88
4-3 相似定律 .....	90
4-4 流体运动的两种状态 .....	95
4-5 圓管中流体摩擦损失水头的計算公式 .....	98
4-6 流体的层流运动 .....	101
4-7 流体的紊流运动 .....	104
4-8 紊流中的摩擦水头损失 .....	109
4-9 紊流中系数 $\lambda$ 与流动情形的关系 .....	110
4-10 决定系数 $\lambda$ 的公式 .....	113
<b>第五章 通道中的局部阻力</b> .....	<b>118</b>
5-1 一般公式 .....	118
5-2 紊流时的局部阻力 .....	118
5-3 水头损失的相加原則 .....	129
<b>第六章 孔口，管嘴及堰</b> .....	<b>132</b>
6-1 經过薄壁小孔的液流 .....	132
6-2 速度系数 .....	134
6-3 收縮現象及收縮系数 .....	136
6-4 流量系数 .....	139
6-5 經过大孔的液流 .....	141

6-6 經過管嘴的液流 .....	143
6-7 經過管孔及噴嘴的液流 .....	146
6-8 堰的液流 .....	148
6-9 矩形堰及其流量實驗公式 .....	151
6-10 三角堰及其流量實驗公式 .....	154
6-11 梯形堰及其流量實驗公式 .....	157
6-12 堰的流量測量法 .....	159
<b>第七章 管中的有壓流動</b> .....	<b>160</b>
7-1 基本概念 .....	160
7-2 簡單管路 .....	160
7-3 并聯管路 .....	163
7-4 沿途均勻流出的管路 .....	157
7-5 虹吸管 .....	168
7-6 導管直徑的選擇 .....	171
7-7 管路中的水錘 .....	172
7-8 壓縮波的傳播速度 .....	174
7-9 水錘的防止及利用 .....	178
<b>第八章 明渠中的均勻流動</b> .....	<b>180</b>
8-1 明渠中均勻流動的計算公式 .....	180
8-2 最有利的渠断面 .....	183
<b>第九章 流体作用在物体上的力</b> .....	<b>188</b>
9-1 射流作用在固定壁面上的冲击力 .....	188
9-2 射流作用在移动壁面上的冲击力 .....	189
9-3 射流的反作用 .....	193
9-4 流体作用在物体上的阻力 .....	194
9-5 圓板摩擦 .....	203
<b>第十章 流体力学概論</b> .....	<b>206</b>
A. 不可壓縮流体 .....	206
10-1 流体微团的变形及迴轉 .....	206
10-2 位流与速度勢 .....	209
10-3 位流的伯努利方程式 .....	211
10-4 二元流动、流函数 .....	212

10-5 环量与斯托克斯定理 .....	214
10-6 繞过圆柱体的无环量流动 .....	216
10-7 繞过圆柱体的带环量流动 .....	218
10-8 机翼 .....	221
10-9 翼栅 .....	225
B. 可压缩流体 .....	229
10-10 音速、亚音速及超音速 .....	229
10-11 能量方程式 .....	232
10-12 最大速度、临界速度、气体参数与 $M$ 的关系 .....	233
10-13 通道面积与流速的关系 .....	235
10-14 冲波 .....	236

## 第二篇 水力机械

緒論 .....	241
第一章 水泵总論 .....	243
第二章 离心式水泵及螺旋式水泵 .....	246
2-1 工作原理、结构及分类 .....	246
2-2 离心水泵的优缺点 .....	251
2-3 离心水泵所产生的水头 .....	251
2-4 离心水泵的效率及功率 .....	253
2-5 离心水泵的基本方程式 .....	257
2-6 比轉数 .....	260
2-7 离心水泵的輸水量、水头及轉数之間的关系 .....	264
2-8 离心水泵的理論性能曲綫 .....	266
2-9 实际性能曲綫 .....	269
2-10 管路特性曲綫 .....	272
2-11 水泵的并联及串联 .....	273
2-12 軸向推力 .....	275
2-13 离心式水泵的构造 .....	277
2-14 螺旋式水泵 .....	285
2-15 水泵的侵蝕及腐蝕 .....	291
2-16 水泵的装置、运轉及保养 .....	293
第三章 往复式水泵 .....	298



3-1 工作原理及分类 .....	298
3-2 往复水泵的排水曲线 .....	302
3-3 往复水泵的吸水及排水过程 .....	305
3-4 空气室 .....	310
3-5 往复水泵的效率及功率 .....	313
3-6 往复水泵的主要部件 .....	314
3-7 往复水泵的构造及调节 .....	320
<b>第四章 迴轉水泵及其他水泵 .....</b>	<b>326</b>
4-1 齒輪泵 .....	326
4-2 螺旋杆泵 .....	329
4-3 水环水泵 .....	331
4-4 噴射水泵 .....	332
4-5 空气揚水泵 .....	335
4-6 內燃水泵 .....	337
<b>第五章 水輪机 .....</b>	<b>338</b>
5-1 水輪机的分类 .....	338
5-2 水輪机的出力及效率 .....	341
5-3 伯尔頓水輪机 .....	342
5-4 佛兰西斯水輪机 .....	344
5-5 螺桨式水輪机 .....	347

# 第一篇 水力学

4

## 緒 論

水力学是研究液体平衡与运动規律的一門科学。研究液体平衡与运动規律的另一門科学称为流体力学。它們的區別在于前者偏重于理論性的研討，而水力学注意工程实际問題的解决；这两門科学曾长期各自发展，但近年来已逐渐接近起来。

由于水是人类生活和生产上必需的物质，所以远在太古时代人們就开始研究关于水的問題，数千年以前，在我国、中亚細亚、埃及、巴比倫、羅馬和希腊就有了大規模的灌溉渠道，各种船只及其他水工建筑物。我国大禹治水的傳說是远在4000年以前，禹是当时人民对洪水作斗争的象征人物，由此可知我国人民在4000年以前已具有水力学方面的实际知識。

水力学的第一部著作是阿基米德的論文“論浮体”，这篇論文是在紀元前約250年写的。阿基米德以后，約十七个世紀，水力学一直没有什么重大的发展。

十五世紀以后，达·芬奇（1452—1519年）、伽利略（1564—1642年）、巴斯加（1623—1662年）及牛頓（1642—1727年）等学者对水力学都有过貢獻，其中牛頓在固体力学方面的著作及其对流体运动的某些叙述（如相似定律及內摩擦定律等）对水力学及流体力学的发展有重大的影响。

水力学及流体力学作为一門独立的科学是开始于伯努利（1700—1782年）、欧拉（1707—1783年）及达拉姆貝尔（1717—1783年）时代。伯努利用物理观点来研究流体的运动，而欧拉則用数学方法分析流体运动的基本規律。

伯努利和欧拉以后，流体力学主要在数学方面发展起来，从

事这方面工作的学者在苏联有葛罗米柯、儒可夫斯基、恰普雷金；在西方国家中有拉格朗什、那维埃、斯道克斯、亥姆霍兹；以及其他学者。由于古典流体力学不能解决许多工程上的实际问题，所以水力学便作为一门实用科学而发展，对这方面有贡献的有罗蒙诺索夫、薛齐、华士巴赫、哈根、泊谔叶、达西、巴辛等人。

1839年哈根在他的论文中叙述了流体运动的两种状态，其后1843年斯道克斯及1880年孟德列夫亦作了同样的叙述；到1883年雷诺才用实验来证实这两种状态（层流与紊流）的存在，他还提出流体运动的相似理论，这些都使水力学的科学基础更加巩固。

近数十年来，由于生产实践的要求和理论的进展以及实验设备的完善，使水力学与流体力学渐趋一致。在理论方面有巨大成就的是关于机翼理论、紊流的各种理论及边界层理论等。

二十世纪以来从事水力学及流体力学工作的著名学者很多，无法全部列举，其中有特殊贡献的学者在苏联有儒可夫斯基（水锤理论及机翼理论的奠基者）、恰普雷金（儒可夫斯基在流体力学及气体力学方面的继承者）、巴甫洛夫斯基（工程水力学的奠基者）；在西方国家中有浦兰特（紊流输送理论及边界层理论的首创者）、卡门（对紊流及边界层理论有重要贡献者）、泰勤（紊流统计理论的创导者）等。而苏联学者近数十年来在水力学及流体力学方面的成就，已大大超过了西方国家。

必须指出，任何科学技术的发展都和生产实践及人民群众的劳动创造分不开，如果具体分析一下，则上述一些科学家的成就都与当时当地的生产水平、技术要求、群众创造及社会环境有着密切的关系。

我国人民历年来在水力学方面亦积累了许多经验和知识，其中如纪元前215年秦始皇时期，史禄开凿沟通湖南与广西两省水路交通的灵渠，纪元前250年战国时代，秦国李冰父子修筑都江堰，灌溉田地数万顷，使四川成为天府之国，这些伟大水利工程及其他许多著名水工建筑物都表明我国古代人民对水力学方面的知识是

很丰富的，但这些知識和經驗由于长期来封建制度的束縛和反动統治以及帝国主义的侵略，根本不可能将它系統化的整理及理論化。解放以后，社会制度根本改变，它給各种科学創造了无比的优越条件及光明前途。对水力学也一样，在短短几年內，在党的领导下，由于淮河、黄河及长江巨大水利工程以及其他各地許多水力樞紐的规划和兴建。由于机械制造工业的飞跃进展，因此对从事水力学的工作者提供了优越的工作条件，同时也提出了很多問題，这些問題的研究和解决，都将促进水力学更进一步的发展。

在任何机械制造专业中都或多或少的要遇到关于流体問題，其中有許多专业不研究流体問題就根本不能进行完善的設計及制造；水力学是研究流体問題的基础科学，因此，对各种机械制造者而言，水力学是必須具备的基础知識之一。

## 第一章 流体及其主要的物理性质

### 作用于液体中的力

#### 1-1 流体

流体是一种物体，它和固体的主要区别在于各质点之間的凝聚力很小，所以任何微小的內力或外力都可以使流体的形状发生显著的变化。如果没有阻碍的話，流体在其本身重量的作用下，也会发生流动。

流体可分为两类：第一类是可压缩流体，所有气体都屬於此种流体；第二类是几乎不可压缩流体，所有液状流体都屬於此类。

可压缩流体（气体）的特性是它具有很大的压缩性及膨胀性，如果对气体加以外力則体积很容易縮小，反之，如果将外力除去，則气体可无限膨胀。所以气体是没有自由表面的。

不可压缩流体（液体）的特性是它对压缩的抵抗很强，即使在相当大的外力作用下，亦几乎不改变它的体积。它不能因外力的除去而膨胀充滿容納它的空間。所以它有时与气体相接触，而

形成一个自由表面。

水力学所研究的对象是液体，但当气体密度改变很少时，则水力学中各种原理及定律都可应用到气体流动中去。

### 1-2 重度、比重及密度

均质流体的重量与其所占有的容积之比称为重度或单位体积的重量，以  $\gamma$  表示，则

$$\gamma = \frac{G}{V} \frac{\text{公斤}}{\text{米}^3} \text{ 或 } \frac{\text{克}}{\text{厘米}^2 \text{秒}^2} \quad (1-1)$$

式中  $G$ ——均质流体的重量，单位为公斤或达因；

$V$ ——均质流体的体积，单位为米<sup>3</sup>或厘米<sup>3</sup>。

若为非均质流体时，则(1-1)式只能决定它的平均重度。在非均质流体中某点的重度可用下式求得

$$\gamma = \frac{dG}{dV} \frac{\text{公斤}}{\text{米}^3} \text{ 或 } \frac{\text{克}}{\text{厘米}^2 \text{秒}^2} \quad (1-2)$$

式中  $dG$ ——无限小流体的重量。

表1-1 某些流体的重度

流 体 名 称	重度 $\gamma$ (公斤/米 <sup>3</sup> )	温度 $t$ °C
蒸馏水	1000	4
海水	1020~1030	15
轻石油	860~880	15
中石油	880~900	15
重石油	920~930	15
煤油	760	15
矿质润滑油	900~930	15
水银	13600	0
甘油	1260	0
熔化石铁	7000	1200
无水酒精	790~800	15
飞机汽油	650	15
普通汽油	700~750	15
空气	1.293	0
空气	1.183	20

重度  $\frac{dG}{dV}$  是将流体作为連續体而求的。

表 1-1 所列举的是某些流体的重度。

流体的重量与同体积温度为 +4°C 时的蒸馏水重量的比值称为该流体的比重，所以比重为无因次值。

均质流体的质量与其所占有的体积之比称为密度，以  $\rho$  表示，则

$$\rho = \frac{M}{V} \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \text{ 或 } \frac{\text{克}}{\text{厘米}^3}, \quad (1-3)$$

式中  $M$ ——均质流体的质量； $V$ ——该均质流体的体积。

如果流体是非均质的，则 (1-3) 式表示它的平均密度。

在 CGS 制中以 +4°C 蒸馏水的密度作为密度的单位。其数值等于 1 厘米<sup>3</sup> 蒸馏水的质量。

重度与密度的关系可由下式表示

$$\gamma = \rho g, \quad (1-4)$$

式中  $g$ ——重力加速度。

### 1-3 流体的膨胀及压缩性

流体的体积随温度而变化，这可用温度膨胀系数  $\beta_t$  来表示，它表示温度  $t$  增高 1°C 时体积的相对变化，可由下式求之：

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \frac{1}{^\circ\text{C}}. \quad (1-5)$$

下表是水的温度膨胀系数值。

表 1-2 水的温度膨胀系数  $\beta_t$

压力 (大气压)	温 度(°C)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
1	$14 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$556 \times 10^{-6}$	$719 \times 10^{-6}$
100	$43 \times 10^{-6}$	$165 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$548 \times 10^{-6}$	$704 \times 10^{-6}$
200	$72 \times 10^{-6}$	$183 \times 10^{-6}$	$426 \times 10^{-6}$	$539 \times 10^{-6}$	—
500	$149 \times 10^{-6}$	$236 \times 10^{-6}$	$429 \times 10^{-6}$	$523 \times 10^{-6}$	$661 \times 10^{-6}$
900	$229 \times 10^{-6}$	$289 \times 10^{-6}$	$437 \times 10^{-6}$	$514 \times 10^{-6}$	$621 \times 10^{-6}$

由表 1-2 可知当温度由 0°C 升高至 50°C 时, 水的温度膨胀系数随压力的增大而增大, 但当温度超过 50°C 时, 则水以及多数其他流体的  $\beta$ , 反因压力的增大而减小。

当作用在液体上的压力增加时, 液体所占有的体积将减小, 这称为液体的压缩性, 可用体积压缩系数  $\beta_p$  来表示, 它表示当压力  $p$  增高 1 公斤/厘米<sup>2</sup> 时, 体积  $V$  的相对变化,  $\beta_p$  可用下式求之:

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \frac{\text{厘米}^3}{\text{公斤}} \quad (1-6)$$

液体的体积压缩系数非常的小, 例如水的体积压缩系数, 当压力:

由 1~500 气压时, 其平均值  $\beta_p = 47.5 \times 10^{-6}$ ;

由 1000~1500 气压时, 其平均值  $\beta_p = 35.8 \times 10^{-6}$ ;

由 2500~3000 气压时, 其平均值  $\beta_p = 26.1 \times 10^{-6}$ 。

由此可知液体的压缩性是很小的, 所以在水力学的一般问题中, 都认为液体是不可压缩的, 只有在某些个别问题中 (例如以后要叙述的水锤问题), 需要考虑它的压缩性。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数, 以  $E_v$  表示, 则  $E_v = \frac{1}{\beta_p} \frac{\text{公斤}}{\text{厘米}^2}$ 。

表 1-3 列举在各种压力和温度下水的体积弹性系数。

表 1-3 水的体积弹性系数  $E_v \frac{\text{公斤}}{\text{厘米}^2}$

$t$ (°C)	压力 $P$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )				
	5	10	20	40	80
0	18900	19000	19200	19500	19800
5	19300	19500	19700	20100	20700
10	19500	19700	20100	20500	21200
15	19700	20000	20300	20900	21700
20	19800	20200	20600	21200	22170

由上表可知, 水的体积弹性系数是随压力而变化的, 所以水并非完全严格的按照虎克定律。

### 1-4 毛細管現象

將一直徑很小的管子放在液体里，則由于液体表面張力作用的結果，管內的液面或高于管外液面(水的情形)，或低于管外液面(水銀的情形)，这种現象称为毛細管現象。設管直徑为  $d$ ，液体表面張力为  $T$ ，接触角为  $\theta$ ，則管內液面的升高或降低  $h$  (图1-1) 可由下式計算之：

$$h = \frac{4T \cos \theta}{\gamma d}, \quad (1-7)$$

式中  $h$  及  $d$  通常以毫米为单位。

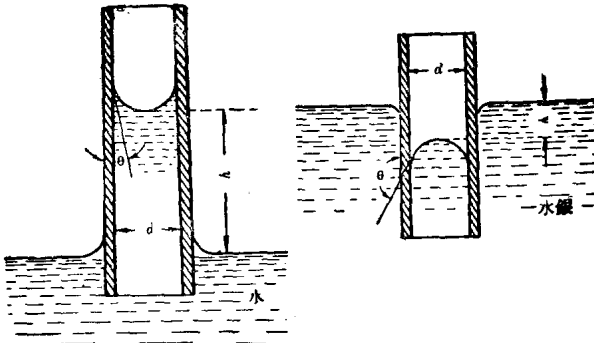


图 1-1

在常溫中，水与水銀的  $T$  及  $\theta$  值大致如下：

水： $T = 0.076$  克/厘米； $\theta = 0 \sim 9^\circ$ 。

水銀： $T = 0.497$  克/厘米； $\theta = 130^\circ \sim 150^\circ$ 。

將上值代入 (1-7) 式內，則

水： $h \doteq \frac{30}{d}$  毫米。

水銀： $h \doteq \frac{10}{d}$  毫米。

用細管作測量压力用时，須考虑毛細管現象，但当水柱測压管  $d > 20$  毫米，水銀柱測压管  $d > 15$  毫米时，毛細管現象可以略去不計。又在 U 形測压管內，因液体两面都受毛細管現象的影响，两相抵消，故亦可不計。关于測压管的說明詳見第二章。



## 1-5 流体的粘性

**1. 粘性及摩擦力** 由于液体质点间存在有内聚力及流体质点与壁面间存在有附着力，所以流体在运动时就要引起变形而发生内切应力，这个性质称为流体的粘性或内摩擦。

今设有流体顺着水平的底面作层状流动。直接接触底壁的流体由于附着力的关系，假定它是附着在壁面上的，所以速度为零；离壁面愈远则速度愈大。现在在流体中取面积为  $F$ （垂直于底

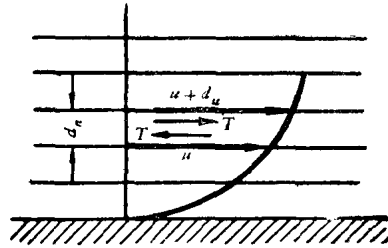


图 1-2

面)，厚为  $dn$  的一个流体层，其下层流速为  $u$ ，而上层流速为  $u + du$ （图 1-2）。由于上下层速度的不等，就产生了流体体积的变形，因而发生摩擦力  $T$ ，根据牛顿的假说及以后彼得罗夫教授的证明，此摩擦力  $T$  的大小与面积  $F$  及速度差  $du$  成正比例，与层的厚  $dn$  成反比例，这称为牛顿内摩擦定律，如以数式表之，则

$$T = \pm \mu F \frac{du}{dn}$$

或 
$$\tau = \frac{T}{F} = \pm \mu \frac{du}{dn}, \quad (1-8)$$

式中  $\tau$  ——相邻两层间的摩擦应力；

$\frac{du}{dn}$  ——速度、梯度；

$\mu$  ——粘性系数或动力粘性系数。

(1-8)式中的  $\tau$  值永远是正值，所以如果  $\frac{du}{dn}$  是正的（如图 1-2），则在它前面取正号，如果  $\frac{du}{dn}$  是负值，则取负号。摩擦力的方向与速度变化的方向有关。例如对图 1-2 的情形，则上层的摩擦力的方向与运动方向相同，而下层则与运动方向相反。对圆管内流动而言（图 1-3），在直径较大的面上摩擦力方向与流体运动方向相反，而在直径较小的面上摩擦力的方向与流体运动方向相同。