

# 水 力 学

第 二 版

上 册

华东水利学院 编

科 学 出 版 社

# 水 力 学

第 二 版

上 册

华东水利学院 编

科 学 出 版 社

1 9 8 3

## 内 容 简 介

本书根据1980年教育部审定《全国高等工业学校四年制水利类“水力学教学大纲(草案)”》,以及近年来的教学实践,对1979年版的体系和内容进行了全面的修订,除力求保持理论联系实际、便于自学等特点外,还注意加强了基础理论,增加了液体三元流动基本原理等章节。各章还选编了一定数量的习题(包括思考题)。

本书分上、下两册,上册包括绪论、水静力学、液体一元恒定流基本原理、液流阻力和水头损失、有压管道恒定流、明渠均匀流、明渠水流的两种流态和水跃、明渠非均匀流等内容。

本书主要作为高等院校水利类各专业本科和专科的教材,也可供水利工程技术人员参考。

## 水 力 学

### 第 二 版

### 上 册

华东水利学院 编

责任编辑 陈大宁 谈德颜

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1983年2月第一版

开本:850×1168 1/32

1983年2月第一次印刷

印张:12 1/2 插页:1

印数:0001—11,150

字数:328,000

统一书号:13031·4213

本社书号:3027·15—2

定价: 2.35 元

## 第二版前言

本书根据1980年教育部审定的高等工业学校四年制水利类各专业适用的“水力学教学大纲(草案)”以及我们的教学实践,对初版的体系和内容进行了全面修订。将原来分散于各章的有关液体运动的基本概念和原理合并为一章,以便学生系统地掌握水力学的基本原理。为使学生获得较为宽广的水力学知识,还增加了液体三元流动的基本原理,边界层及紊流的发生和发展的概念,量纲分析和 $\pi$ 定理等章节。同时仍保持原书力求理论联系实际、少而精、通俗易懂、便于自学等原则。

本书分上下两册,包括了水利类各专业所需要的基本内容,为便于教学,各章还选编了一定数量的习题(包括思考题)。在使用时,各专业可按教学大纲要求作必要的取舍,为了分清主次,将部分加深内容印成小号字,以便选择。

本书修订工作仍为集体讨论、分工编写,由许荫椿、胡德保、薛朝阳主编,参加执笔的还有(以姓氏笔划为序):马法三、刘润生、陈立德、李家星、汪德燿、张林夫、郭觉新、温丽林等同志。张长高同志对全书进行了审阅。在修订工作中还得到了郭子中、李耀中、陈玉璞等同志的指导。

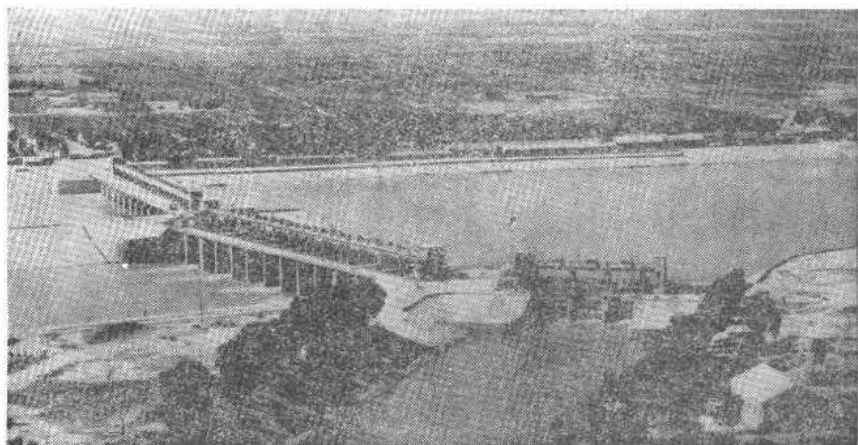
参加本书编写大纲讨论会、初稿审查会以及提出书面意见的有(按笔划顺序)山东水利学校、广西大学、广西水电学校、广西交通学校、大连工学院、内蒙古农牧学院、华北水电学院、江西工学院、江西工学院水利分院、江苏农学院、合肥工业大学、华南工学院、河北水利专科学校、杭州大学、河北农业大学、陕西机械学院、青海工农学院、贵州工学院、南京大学、南京航务专科学校、浙江大学、黄河水利学校、葛州坝水电工程学院、湖南水利学校、福州大学、福建水电学校、新疆大学、新疆石河子农学院等二十八所院校

的代表。对于他们的宝贵意见和建议,我们表示衷心感谢。

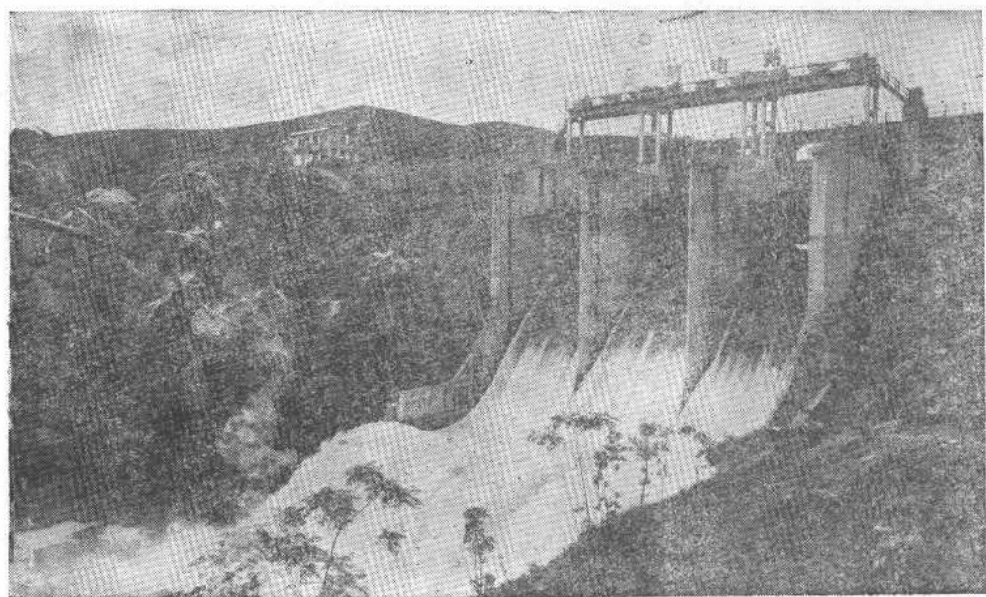
由于水平所限,书中一定会有缺点、错误,欢迎读者指正。

华东水利学院

1982年4月



山东省德州四女寺水利枢纽



江西省长冈水力发电站

# 目 录

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b> .....               | 1   |
| § 1-1 水力学的问题和任务.....              | 1   |
| § 1-2 影响液体运动因素的分析.....            | 5   |
| § 1-3 作用于液体的力.....                | 17  |
| § 1-4 水力学的理论基础和研究方法.....          | 19  |
| 习题 .....                          | 20  |
| <b>第二章 水静力学</b> .....             | 23  |
| § 2-1 概述.....                     | 23  |
| § 2-2 静水压强及其特性.....               | 23  |
| § 2-3 静水压强分布规律.....               | 26  |
| § 2-4 压强的量测.....                  | 36  |
| § 2-5 作用于平面上的静水总压力.....           | 40  |
| § 2-6 作用于曲面上的静水总压力.....           | 49  |
| § 2-7 浮力与浮体的稳定.....               | 55  |
| § 2-8 欧拉液体平衡微分方程.....             | 62  |
| § 2-9 液体平衡微分方程的积分.....            | 63  |
| § 2-10 重力和其它质量力同时作用下的液体平衡问题 ..... | 65  |
| 习题 .....                          | 69  |
| <b>第三章 液体一元恒定流基本原理</b> .....      | 82  |
| § 3-1 概述.....                     | 82  |
| § 3-2 描述液体运动的方法.....              | 83  |
| § 3-3 液体运动的一些基本概念.....            | 86  |
| § 3-4 恒定流连续方程.....                | 91  |
| § 3-5 恒定元流能量方程.....               | 94  |
| § 3-6 缓变流及缓变流断面压强分布规律.....        | 104 |
| § 3-7 恒定总流能量方程.....               | 109 |
| § 3-8 恒定总流动量方程.....               | 120 |

|                                        |            |
|----------------------------------------|------------|
| 习题 .....                               | 131        |
| <b>第四章 液流阻力和水头损失</b> .....             | <b>143</b> |
| § 4-1 概述 .....                         | 143        |
| § 4-2 均匀流切应力与沿程水头损失的关系 .....           | 144        |
| § 4-3 层流、紊流及其判别 .....                  | 146        |
| § 4-4 圆管中的层流 .....                     | 153        |
| § 4-5 沿程水头损失的通用公式 .....                | 156        |
| § 4-6 紊流特征及紊流半经验理论 .....               | 157        |
| § 4-7 沿程阻力系数 $\lambda$ 的试验研究 .....     | 170        |
| § 4-8 沿程水头损失的经验公式——谢才 (Chézy) 公式 ..... | 176        |
| § 4-9 边界层概念及边界层离体现象 .....              | 179        |
| § 4-10 局部水头损失 .....                    | 183        |
| 习题 .....                               | 194        |
| <b>第五章 有压管道恒定流</b> .....               | <b>196</b> |
| § 5-1 概述 .....                         | 196        |
| § 5-2 短管的水力计算 .....                    | 197        |
| § 5-3 长管的水力计算 .....                    | 212        |
| 习题 .....                               | 226        |
| <b>第六章 明渠均匀流</b> .....                 | <b>231</b> |
| § 6-1 概述 .....                         | 231        |
| § 6-2 明渠均匀流的水力计算 .....                 | 235        |
| § 6-3 明渠均匀流水力计算的其它问题 .....             | 245        |
| 习题 .....                               | 256        |
| <b>第七章 明渠水流的两种流态及水跃</b> .....          | <b>259</b> |
| § 7-1 明渠水流的流动状态 .....                  | 259        |
| § 7-2 断面单位能量、临界水深、临界底坡 .....           | 262        |
| § 7-3 明渠水流流态转换的局部水力现象——水跌与水跃 .....     | 271        |
| § 7-4 水跃基本方程、水跃函数及水跃的水力计算 .....        | 275        |
| 习题 .....                               | 286        |
| <b>第八章 明渠非均匀流</b> .....                | <b>289</b> |
| § 8-1 概述 .....                         | 289        |
| § 8-2 棱柱形明渠水面曲线微分方程 .....              | 291        |



|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| § 8-3 棱柱形明渠水面曲线形状分析.....                   | 293 |
| § 8-4 棱柱形明渠水面曲线计算.....                     | 308 |
| § 8-5 非棱柱形明渠水面曲线计算.....                    | 320 |
| § 8-6 天然河道水面曲线计算.....                      | 327 |
| § 8-7 明渠弯段水流.....                          | 353 |
| 习题 .....                                   | 361 |
| 附录.....                                    | 366 |
| 表 I $i > 0$ 的函数 $\varphi(\eta)$ 值.....     | 366 |
| 表 II $i = 0$ 的函数 $\varphi(\xi)$ 值 .....    | 379 |
| 表 III $i < 0$ 的函数 $\varphi(\zeta)$ 值 ..... | 384 |
| 图解 I 梯形、矩形、三角形断面明渠均匀流水力要素求解图               |     |
| 图解 II 梯形及矩形断面明渠正常水深 $h_0$ 求解图              |     |
| 图解 III 梯形断面明渠临界水深 $h_k$ 求解图                |     |
| 图解 IV 矩形断面明渠水跃共轭水深 $h'$ , $h''$ 求解图        |     |
| 图解 V $\frac{1}{K}$ 求解图                     |     |

# 第一章 绪 论

## § 1-1 水力学的问题和任务

人类在改造自然的长期斗争中，特别是在兴建水利及其它工程的生产活动中，通过反复实践总结，逐步认识了液体运动的各种规律，形成了水力学这门学科。因此，水力学是研究液体平衡和机械运动规律及其应用的一门技术科学，它是力学的一个分支。水力学不仅广泛应用于水利工程之中，而且也应用于机械、冶金、采矿、化工、石油、船舶和城市建筑等工程中。

### 一、水利工程中的水力学问题

为了明确水力学的任务，先以水利枢纽的设计为例来介绍水利工程中常见的水力学问题。

一个水利枢纽通常包括挡水坝（混凝土坝和土坝等）、溢洪道（或泄洪隧洞）、水力发电站和船闸等主要水工建筑物。图 1.1 为某水利枢纽布置示意图。

对于混凝土挡水坝（图 1.2），为了设计坝体断面和校核坝的稳定性，必须计算上、下游的水对坝体的作用力。因水库水位高于坝的下游水位，水库中的水将通过坝基土壤或岩石中的缝隙向下游渗漏，这种流动称为渗流。校核坝体稳定性时，必须计算渗流对坝底的作用力；同时还应考虑渗流可能对坝基产生的破坏作用。

对于土坝（图 1.3），在坝身和坝基中都会发生渗流。设计土坝时，必须计算由于渗流引起的水量漏失和渗流可能对土坝产生的破坏作用。

对于溢洪道（图 1.4），首先必须计算需要多大的溢流孔尺寸才能通过溢洪道的设计流量<sup>1)</sup>。这就是溢洪道过水能力的计算。当

1) 流量是单位时间内流过某一过水断面的液体体积，见第三章 § 3-3。

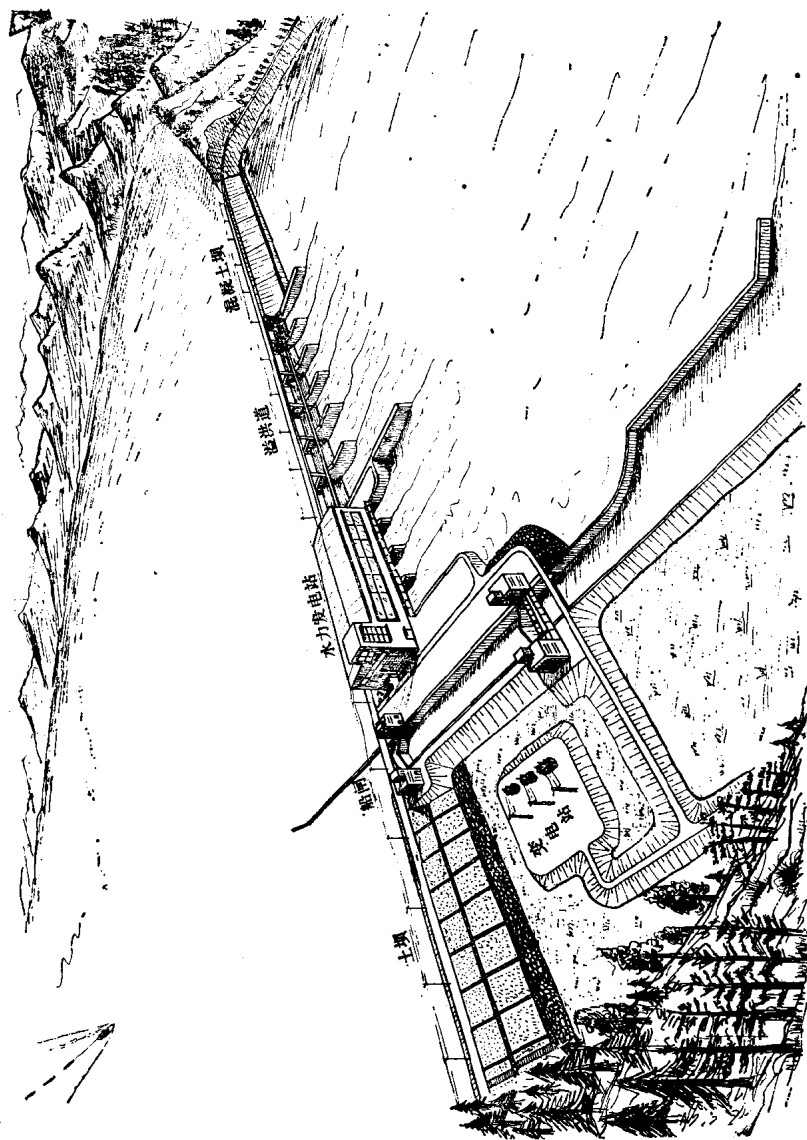


图 1.1

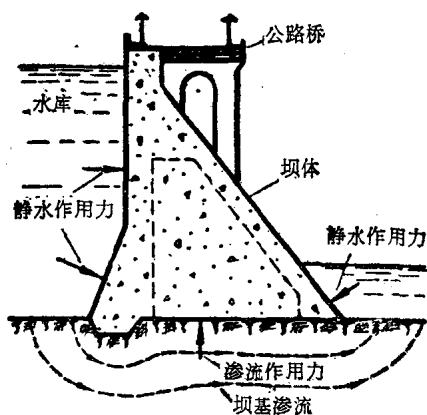


图 1.2



图 1.3

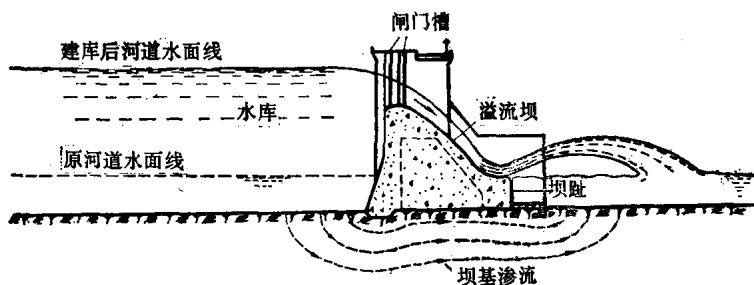


图 1.4

溢洪道泄洪时,由于上下游水位差较大,水库的水经由溢流坝坝面泄至下游时,往往具有较大的流速(即水流速度),可能冲刷下游河床及岸坡,甚至危及坝身的安全。因此,必须采取措施,消耗下泄水流的部分动能,以减轻对下游河床和岸坡的冲刷作用。这就是

溢流坝下游水流的消能问题。此外，还应计算闸门及坝面的静水作用力和坝底渗流作用力。在某些情况下则应计算流动的水对坝面及下游保护段的动水作用力。

对于泄洪隧洞(图 1.5)，必须计算需要多大的隧洞断面才能通过隧洞的设计流量。这就是隧洞过水能力的计算。同时还应进行洞内流速、洞身静水和动水作用力以及出口消能的计算。

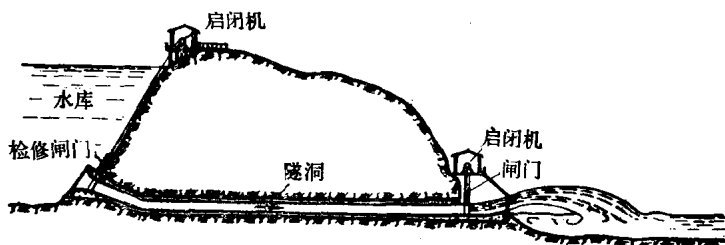


图 1.5

对于水力发电站和船闸，也必须进行管道过水能力、静水和动水作用力以及渗流等问题的计算。

河道中筑坝后，抬高了坝上游河道中的水位（见图 1.4），可能淹没河道两岸的部分农田、乡村及城镇，并使两岸地下水位相应升高，影响作物生长。为了正确估计筑坝后水库的淹没范围，必须计算坝上游水位沿河道的变化。这就是河道水面曲线的计算。

以上简单地介绍了水利枢纽工程设计中常见的水力学问题。实际上任何一项水利工程的规划、设计、施工和运用中都会遇到各种水力学问题。通过上例，可把水利工程中常见的水力学问题归纳为以下五类：

1. 水对水工建筑物的作用力问题；
2. 水工建筑物的过水能力问题；
3. 水工建筑物下游水流的消能问题；
4. 河渠水面曲线问题；
5. 水工建筑物的渗流问题。

此外，还有其它一些水力学问题，如流速和作用力等随时间而变化的非恒定流问题，高速水流中的掺气、气蚀、脉动、振动和冲击

波等问题,挟沙水流问题,以及海洋、湖泊、水库中的波浪运动问题等。

## 二、水力学的任务和研究对象

为了解决实际工程中的各种水力学问题,水力学的任务首先是研究液体平衡和机械运动的各种基本规律,这就是水力学的基本原理部分;其次是研究如何应用基本规律来解决各种具体问题的方法,这就是水力学的应用部分。

水力学的研究对象是液体。液体是由无数进行着复杂的微观运动的液体分子所组成,而且分子之间存在空隙。但水力学并不研究液体分子的微观运动,只研究液体的宏观机械运动规律。因为液体分子之间的空隙与我们所研究的液体范围相比要小得多<sup>1)</sup>,因此水力学中不考虑液体分子间空隙的存在,而把液体看作由无数没有微观运动的液体质点<sup>2)</sup>组成的没有空隙存在的一种连续介质,并认为液体中各种物理量的变化也是连续的。这样既可以不考虑复杂的分子运动,又可应用高等数学中的连续函数来表达液流中各种物理量之间的关系,为研究液体运动规律带来很大方便。把液体看作连续介质虽然是一种假设,但实践证明,在这一假设下得到的结论具有足够的精确度,完全能够满足工程实际的要求。今后对于水力学问题的研究,除某些特殊问题(如高速水流中掺入空气或水流中因局部负压而发生空穴现象等,都将破坏水流的连续性)外,都是建立在连续介质这一假设基础上的。

### § 1-2 影响液体运动因素的分析

工程实际中的液流受各种复杂因素的影响,运动形式多种多样,运动状态千变万化。了解影响液体运动的各种因素将有助于研

---

1) 例如两相邻水分子的间距约为  $3 \times 10^{-8}$  厘米。

2) 液体质点的概念是,每一液体质点应包含大量的液体分子,并保持着宏观液流的一切特性,但其体积与液体宏观特性足以显示其变化的范围或尺度相比要小得多,以致可以不考虑其体积的大小,而认为是液流空间中的一个点。

究液体运动规律。

液体的运动状态与液体的物理性质密切相关，同时液体又在一定的边界约束下而流动，因此液体的主要物理性质和液体的边界将是影响液体运动的重要因素。

## 一、液体的主要物理性质

液体的主要物理性质有质量、重量、易流性、粘滞性、压缩性和表面张力等。下面论述这些物理性质及其对液体运动的影响。

### (一) 质量

液体和其它物质一样具有质量。单位体积液体的质量称为液体的密度，用 $\rho$ 表示。设均质液体<sup>1)</sup>的质量为 $M$ ，体积为 $W$ ，则

$$\rho = \frac{M}{W} \quad (1.1)$$

在国际单位制(SI单位制)中，质量的单位为克或千克，则密度的单位为克/厘米<sup>3</sup>或千克/米<sup>3</sup>。

严格地说，液体的密度随液体的温度及其所受压力的变化而有微小变化，但实用上一般可看作常数。对于水<sup>2)</sup>，常以一个大气压强下温度为4℃时的密度 $\rho = 1 \text{ 克/厘米}^3 = 1000 \text{ 千克/米}^3$ 作为计算值。

### (二) 重量

地球对地球上的物体的吸引力称为物体的重力或重量。

“水往低处流。”这是人们对水流运动规律的一般常识。因为水和地球上其它物质一样，总是受到重力的作用，而且重力作用的方向总是铅垂向下，当无外界能量加入时，水流运动的趋势必然从高处流向低处<sup>3)</sup>。水利工程中大部分水流属于这种情况。例如，渠

---

1) 密度均匀分布的液体称为均质液体。本书除挟沙水流、高速水流等少数章节外，只讨论均质液体。

2) 4℃时水的密度最大。当温度高于或低于4℃时，水的密度将减小。水利工程中，水温在0℃至35℃范围内变化，其密度的变化不超过0.4%。

3) 当有外界能量加入时，水可从低处流向高处。例如抽水机取得了动力机的能量，可把水从低处引向高处。

道必须有一定的纵向水面坡度才能引水灌溉；水库中的水通过溢洪道泄入水位较低的下游河道等。

单位体积液体的重量称为液体的容重或重率，用  $\gamma$  表示。对均质液体，若重量为  $G$ ，体积为  $W$ ，则

$$\gamma = \frac{G}{W} \quad (1.2)$$

在国际单位制中，力的单位为牛顿或千牛，则容重的单位为牛顿/米<sup>3</sup> 或千牛/米<sup>3</sup> <sup>1)</sup>。

因重力  $G = Mg$  ( $g$  为重力加速度)，代入式(1.2)得  $\gamma = \frac{M}{W}g$ 。

比较式(1.1)可得

$$\gamma = \rho g \quad (1.3)$$

或

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1.3a)$$

液体的容重和密度一样随液体温度和压力的变化而有微小变化，实用上亦看作常数。对于水，常以一个大气压强下温度为 4℃ 时的容重  $\gamma = 9800$  牛顿/米<sup>3</sup> 作为计算值。

### (三) 易流性

把液体盛于不同形状的容器中，它就具有不同的形状。把容器中的液体倒在地上，它就不能保持原来的形状而发生流动。这说明液体不象固体那样能保持固定的形状，而是很易变形的。从力学观点来说，固体在一定的切力作用下能够保持固定的形状，液体则一受剪切(尽管切力很小，只要切力存在)就会连续变形(即流动)。液体的这种特性称为易流性。这是液体和固体物理性质之间的最大区别。

---

1) 我国工程界习惯用工程单位制。它以力、长度、时间的单位为基本单位，其它物理量的单位由基本单位导出。工程单位制中，力的单位为公斤或吨。1 公斤 = 9.8 牛顿，1 吨 = 9.8 千牛。容重的单位为公斤/米<sup>3</sup> 或吨/米<sup>3</sup>。1 公斤/米<sup>3</sup> = 9.8 牛顿/米<sup>3</sup>。密度的单位为公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup> 或吨·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>。1 公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup> = 9.8 千克/米<sup>3</sup>，其余类推。

在实用上，水的容重  $\gamma = 1000$  公斤/米<sup>3</sup> = 1 吨/米<sup>3</sup>，密度  $\rho = 102$  公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup> = 0.102 吨·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>。



液体的易流动性还可利用下面的分析来说明。图 1.6a 为一放在地面上的静止固体。在固体中任截一斜面  $ab$ ，则  $ab$  面上部的固体对其下部固体的作用力为体积  $abc$  的重量  $G$ 。因为  $ab$  面为任意斜面，则  $G$  可分解为  $ab$  面上的压力  $P$  和切力  $T$  两个分力，如图 1.6b 所示。在这种压力和切力的作用下，下部固体虽有微小变形，但当变形引起的内力达到与外力相平衡时，变形即停止。这说明固体在一定的切力作用下能保持固定的形状。对于静止的液体，如果要保持图 1.6a 所示的固体的形状，则必须有侧壁的约束（图 1.6c），否则就会在自重引起的剪切作用下而连续变形（流动）。这

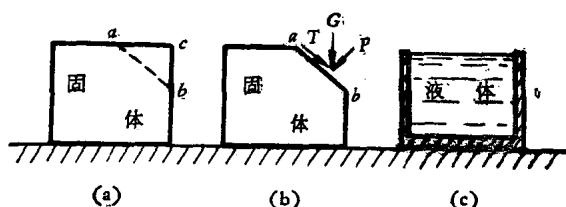


图 1.6

就说明液体具有在剪切作用下很易变形的特性。同时也说明静止液体内部是不存在切力的。

从微观上看，液体的易流动性是因液体和固体分子运动特性不同而引起的。从物理学知，固体分子是围绕某一固定的平衡位置而不断振动的。当外力的作用企图使固体分子离开其平衡位置时，固体分子间的吸引力（表现为内聚力）便企图维持其平衡位置而起抗拒外力的作用。只有当外力足够大时，才能使固体分子离开其平衡位置而发生较大变形（即塑性变形）。因此固体可以承受一定的外力（包括自重引起的拉力和切力）而保持固定的形状。但是液体分子只是围绕一种暂时平衡的位置而振动，并在此位置上停留一极短暂的时限（约  $10^{-10}$  秒），即液体分子极为频繁地变换着其平衡位置，不断地由一个位置转到另一位置。由于液体分子的这种固有的运动特性，使得它几乎不能抗拒由于任何大小的外力（包括自重）作用而引起的缓慢变形。这就是液体存在易流动性的