

高等学校交流讲义

# 水力学及水力机械

SHUILIXUE JI SHULI JIXIE

上册

北京工业学院  
西北工业大学 合編

人民教育出版社

高等学校交流讲义



# 水力学及水力机械

SHUILIXUE JI SHUILI JIXIE

上册

北京工业学院  
西北工业大学 合編

人民教育出版社

本书是在1961年4月間，由华东水利学院、南京工学院、天津大学、清华大学、华中工学院、成都工学院、武汉水利电力学院和大連工学院等八所学校的水力学教研組的有关教师选自北京工业学院、西北工业大学所編写的讲义，經過了小的修改和編輯加工。

全书除緒論外，共有十二章，分上下两册出版。前六章为水力学的基本理論部分，包括：緒論，液体的主要物理性质，水靜力学，水动力学原理，层流紊流，管路的水力計算，孔口及管咀的水力計算。后六章为水力机械部分，包括：水力机械概述，水泵概述，离心式水泵，活塞式水泵，回轉式水泵、水力傳动，水輪机。

本书的緒論，第一章至第七章的第一节取自北京工业学院水力学教研組的“水力学及水力机械”讲义，其余部分則取自西北工业大学的“工程流体力学”讲义。

本书可作高等工业学校机械类各专业“水力学及水力机械”課程的交流讲义，也可供有关工程技术人員参考。

### 簡裝本說明

目前 850 × 1168 毫米規格紙張較少，本书暫以 787 × 1092 毫米規格紙張印刷，定价相应减少 20%。希鑒諒。

## 水力学及水力机械

上册

北京工业学院  
西北工业大学 合編

人民教育出版社出版 高等學校教学用書編輯部  
北京宣武門內承恩寺7号  
(北京市书刊出版业营业許可証出字第2号)

商务印书館上海厂印裝  
新华书店上海发行所发行  
各地新华书店經售

統一書号 15010·1049 开本 787 × 1092 1/32 印張 8 7/16  
字数 202,000 印数 1—8,900 定价(5) 羊 0.88  
1961年9月第1版 1961年9月上海第1次印刷

# 上册目录

緒論 .....	1
§ 0-1. 水力学及水力机械的定义 .....	1
§ 0-2. 学习水力学及水力机械的意义 .....	2
§ 0-3. 水力学及水力机械的发展简史 .....	3
§ 0-4. 我国在水力学及水力机械方面的成就 .....	5
第一章 流体的主要物理性质 .....	8
§ 1-1. 流体的概念 .....	8
§ 1-2. 密度及重度 .....	9
§ 1-3. 压缩性及膨胀性 .....	12
§ 1-4. 表面张力 .....	15
§ 1-5. 粘性 .....	18
§ 1-6. 作用在流体上的力 .....	26
第二章 水静力学 .....	29
§ 2-1. 水静压力及其特性 .....	29
§ 2-2. 流体的平衡微分方程式 .....	33
§ 2-3. 绝对静止液体 .....	38
§ 2-4. 相对静止液体 .....	53
§ 2-5. 平面上的液体总压力 .....	66
§ 2-6. 曲面上的液体总压力 .....	71
§ 2-7. 阿基米德原理·漂浮原理 .....	77
§ 2-8. 简单水力机械 .....	82
第三章 水动力学原理 .....	87
§ 3-1. 水动力学基本概念 .....	87
§ 3-2. 连续方程式 .....	97
§ 3-3. 理想液体运动的微分方程式 .....	102
§ 3-4. 理想液体的伯努利方程式 .....	104
§ 3-5. 实际液体运动的微分方程式 .....	115
§ 3-6. 实际液体总流的伯努利方程式 .....	126
§ 3-7. 不稳定流的伯努利方程式 .....	139

第四章 层流、紊流.....	143
§ 4-1. 水动力学相似原理 .....	143
§ 4-2. 雷诺实验 .....	153
§ 4-3. 圆管中的层流 .....	157
§ 4-4. 平行平板间的层流 .....	165
§ 4-5. 平行圆盘间的层流 .....	173
§ 4-6. 偏心圆环缝隙中的层流 .....	176
§ 4-7. 圆管中的紊流 .....	183
§ 4-8. 局部阻力 .....	205
§ 4-9. 水力阻力迭加原则 .....	215
第五章 管路的水力计算 .....	223
§ 5-1. 概述 .....	223
§ 5-2. 短管的水力计算 .....	224
§ 5-3. 长管的水力计算 .....	229
§ 5-4. 管中的水锤现象 .....	237
第六章 孔口及管咀的水力计算 .....	246
§ 6-1. 定水头下薄壁圆形小孔口的出流 .....	246
§ 6-2. 收缩系数、流速系数及流量系数 .....	248
§ 6-3. 定水头下圆柱形外伸管咀的出流 .....	251
§ 6-4. 液体自其他管咀的出流 .....	255
§ 6-5. 变水头下薄壁小孔口的出流 .....	258
§ 6-6. 射流的动力性能 .....	261

# 緒 論

## § 0-1. 水力学及水力机械的定义

水力学是力学的一部分。它是在不断总结生产实践和科学研究经验的基础上逐渐发展起来的,应用试验和分析的方法研究液体平衡及运动的规律,以及这些规律的工程应用。

在研究物体平衡及运动规律的力学科学中,因其研究对象的不同又分为许多分支。

以受力后不变形的绝对刚体为研究对象的分支是理论力学。

以受力后产生微小变形的固体为研究对象的分支。是固体力学。

以受力后产生大变形的流体为研究对象的分支是流体力学。流体包括液体及气体两大部分,因而流体力学亦包括两大部分:液体力学及气体力学。液体力学中通常以水来作为液体的代表,故此部分通称之为水力学。但是我们注意到,水力学中的原理并不仅适用于水,而是普遍适用于各种液体,甚至亦适用于低速运动的气体。

流体力学比水力学的研究对象更为广泛,在研究方法上它们也有区别。

流体力学在研究流体平衡及运动规律时,往往是从严格的数学推理出发,追求问题的严密性和精确性。但是实际的流体运动规律相当复杂,有时很难用数学方法表达和解决。

水力学在研究液体平衡及运动规律时是从简化的工程观点出发,主要目的在于解决实际问题。它的基本理论固然是建立在流

体力学的基础上,但是又广泛地采用实验数据和经验公式。这样便可以绕过很大的、甚至有时是不可克服的数学难关,从而得到工程要求精度内的近似结果。所以说水力学具有理论联系实际的显著特点。

在这里我们先提出水力机械的概念,至于详细讨论它,则留待以后的章节来谈。

简单来说,水力机械就是液体能量和机械功发生互相转化的一种设备。其中包括泵(机械功转化成液体能量)、水轮机(液体能量转化成机械功)及液力传动(机械功转化成液体能量,再由液体能量转化成机械功)三大类。

水力机械的原理是建立在水力学原理之上的。利用这些水力学原理我们设计制造出各式各样的水力机械。这些机械在现代各工程部门中皆有着广泛的应用。

## § 0-2. 学习水力学及水力机械的意义

水力学及水力机械是高等工业学校的一门基础技术课,不论航空、动力、造船、机械、电机等等专业都要学习本课程。事实上,在国民经济的各个部门中,都要或多或少地遇到液体,有时利用它的能量,有时利用它的平衡或运动规律。

这里我们以机械工程为例来说明水力学及水力机械的广泛应用。任何机械厂中都离不开水泵、油泵、水压机、油压机这类的通用水力机械,也离不开压力表、流量计之类的水力仪表。机床中有冷却系、润滑系以及最新式的液体传动装置。此外离心浇铸、水力轴承、水力轴封、液力缓冲器、液力起重机等等都与水力学和水力机械有关。

在汽车和拖拉机的发动机中会遇到冷却水泵的计算、润滑理论的分析、汽化器中燃料与空气的分配等等水力学问题;在发动机

实验中要用到液体和气体的流量、压力等测定，水力测功器使用问题等等，这些都与水力学及水力机械有关。

在设计液压驻退机及复进机中必须要掌握液体经孔口流出的水力学原理，在分析弹道阻力时必须了解涡流、附面层分离、层流、紊流这些水力学现象及规律。

此外水力学亦是气体动力学的基础，据此可以进一步学习喷管及火箭理论。

液力和液压传动是典型的水力机械。

液力传动中泵轮与离心泵相似，涡轮与水轮机相似，因而所有的水力学及水力机械原理都是研究泵轮及涡轮理论和设计时所需要的。

液压传动中主要是油泵及油马达，为了决定它们的压力损失、容积损失及效率，为了计算管道及油阀的特性及尺寸都必须首先掌握水力学的基本原理。

上面仅仅是举出一些较明显的例子。实际上，水力学及水力机械的问题当然比这更多。显然，水力学及水力机械的基本理论，是从事机械工业的技术人员所必需具备的基础技术知识。

### § 0-3. 水力学及水力机械的发展簡史

水力学及水力机械这门科学的产生和发展，自始至终都是与人类社会的生产劳动相联系着的。

从中国、埃及、希腊所遗留下来的古代水利工程遗址上，可以看到，远在两、三千年以前，人们在同自然界的斗争中已经积累了一些有关的知识和经验。

最早的科学著述当推公元前 250 年的阿基米德的“论浮体”。其后，由于奴隶制及神权和宗教观念的束缚，在很长时期内水力学没有什么显著的进展。



十六世紀到十七世紀，在歐洲開始有了資本主義生產的萌芽。在水力學方面，1612年加里略提出了潛體的沉浮原理，1643年托里拆里導出了液體的孔口出流公式，1650年巴斯加得到了有名的靜止液體中液體靜壓力的傳布規律——巴斯加原理。1686年牛頓從理論上導出繞流阻力由兩部分組成，一部分是壓差阻力，與速度平方成比例；一部分是摩擦阻力，與速度梯度成比例；——這就是牛頓的內摩擦定律。但是當時的成就還不足使水力學發展成獨立的學科體系。

十八世紀在英國出現了大規模的產業革命。航海、炮兵，礦山排水等大量工業需要為理論研究工作奠定了雄厚的物質基礎。這一時期的理論研究工作取得了很大成就，水力學中最重要的基礎——連續性方程式，理想流體的運動微分方程式及伯努利方程式等都是這時提出的。它們使得水力學逐漸形成一門完整的學科體系。

十九世紀初，雖然得到了實際流體運動的微分方程式，但是它只能解決比較簡單的運動問題，對於實際上常常遇到的複雜運動則無能為力。而生產實踐不斷向水力學提出新的需要解決的問題，於是便採用了簡化近似的理論和大量的實驗數據及經驗公式。久而久之，便使得實驗水力學離開十八世紀的古典流體力學理論而單獨形成一門實驗和數據的科學。直到二十世紀初期，由於相似原理的發展才結束了這種理論和實際脫離的局面。

十月社會主義革命开辟了人類歷史的新紀元。社會主義社會給科學無限繁榮奠定了基礎。蘇聯在宇宙航行方面的偉大成就，同時充分表明在流體力學方面也有了很大的發展。

第聶伯爾、古比雪夫、勃良斯克及克拉斯諾雅爾斯克等水電站的水利建設及水輪機容量都是世界上首屈一指的，這些都表明在水力學及水力機械方面的巨大成就。

## § 0-4. 我国在水力学及水力机械方面的成就

历代以来我国在水力学及水力机械方面有許多发明創造。茲摘其要者簡述如下：

### 1. 水力学原理

古代的計时器械“刻漏”或“銅壺滴漏”，在我国已有 2000 年以上的历史。其原理为利用水的浮力，及定水头下孔口出流。

### 2. 水輪机雛形

我国古代的水輪乃是現代水輪机的雛形，它的最初发明約在 3000 多年以前。

有文字記載的是：公元 37 年(后汉)杜詩做“水排”，用水輪的动力来鼓风化鉄。后来仍用这套机构，只是把鼓风箱子用面罗代替就成为“水击面罗”用来篩面。

水碓古已有之，到了公元 260—270 年間，晋代杜預做“連机水碓”用以搗米。

公元 500 年左右崔亮做“水碾”及“水磨”已經在一个輪上帶两个或更多的水磨，是謂“連二水磨”或“連三水磨”。

此外，宋、元时代我国已有水輪大紡車，而英国与蒸汽机并称的水力紡紗机的发明是在 1796 年，实际上比我国至少晚四、五百年。

### 3. 水泵雛形

我国远在 3600 多年以前就发明了桔槔和轆轤这类的原始提水工具。而后改制成为翻車(今称之为龙骨水車)，已具有水泵的雛形。翻車有手搖、足踏及牛轉等种类。

### 4. 水輪-水泵联合装置雛形

唐代以前，我国就发明了用水力提水的水輪-水泵联合装置。如水轉翻車。更巧妙的是筒車及高轉筒車，把水輪及水泵集中在

一起，成为自动化的水泵。可以日夜不息地提水，灌溉农田。后汉书上說它“昼夜不息，百亩无忧”。唐宋文人曾做詩歌称頌这种自动化水泵的功效。

回顾这段水力机械的发明史，我們可以自豪地說，我国在水力机械方面，发明得最早，在工、农业生产上也应用得极为广泛，在推进生产力方面起过較大的作用。

虽然我国劳动人民有过这样的光輝成就，但由于长期封建制度的束縛及近百年来帝国主义的侵略，近代的中国科学大大落后了。解放前中国在現代水力学及水力机械方面是一穷二白的，旧中国不能造水輪机，不能造較好較大的水泵，至于液力傳动則更是无从提起了。

中国人民在中国共产党和毛主席的领导下，推翻了帝国主义、封建主义和官僚資本主义，从而根本扫清了阻碍科学发展的主要障碍。

建国十一年来，我們在党的领导和苏联及其它兄弟国家无私的援助下，以高速度进行社会主义建設。一系列水电站的兴建有力地推动了水力机械的发展，許多水电站的水輪机都是我国自己設計和制造的，而在旧中国則从来没有生产过一台水輪机。在水泵制造方面，解放前只有一些私营小工厂从事小型水泵的仿制，数量少质量低。解放后，由于工农业发展的需要，改进和新建了許多水泵制造厂，現在全国已經拥有一批龐大的設計队伍，可以自己設計制造几十种不同类型的水泵了。

內燃水泵是排灌机械的大革命。尽管几十年前这种水泵，首先为英图洪孚理所发明，但是其結構繁杂，运用不便。我国在1958年首創了結構简单、制造与使用均甚方便的內燃水泵。从它一开始誕生，就受到党和广大人民的重視。

解放前我国根本就沒有液力傳动与液压傳动工业。解放后，

1958年我国出产的东风牌及井冈山牌小轿车上首先采用了液力传动。1959年我国试制成功第一辆内燃机车。车上装有我国自己设计制造的大型液力传动。这一液力传动是许多科学研究机构、企业、学校大协作制造成的，因而也是群众运动的产物。

我国水力机械工业还很年轻，但是从几年的大跃进当中，我们可以看到它的发展前途是无可限量的，也完全可以确信，水力学及水力机械将会在我国得到更大的发展。

## 第一章 流体的主要物理性质

流体在各种不同水力现象中的状态和性质,都与它的物理性质有关,因而在没有讨论流体的力学规律以前,有必要先了解一下流体的概念及其主要的物理性质。在这一章中我们谈三个问题:流体的概念、流体的物理性质(密度、重度、压缩性、膨胀性、表面张力、主要是粘性)和作用在流体上的力。

### § 1-1. 流体的概念

凡是不能象固体一样保持其一定形状的物体称为流体。

任何微小的外力都可以使流体发生很大的变形,甚至在没有任何阻碍时,流体在其本身的重力作用下也要发生流动。流体与固体的区别就在于它无一定形状,具有流动性。

流体有两种,一种是气体,一种是液体。

气体分子排列比较松散,分子力比较弱,在较小的外力作用下,其体积亦可能发生甚大的变化,因而通常称之为可压缩流体。

液体分子排列比较紧密,分子力比较强(相对于气体而言)在极大的外力作用下其体积才只可能发生极微小的一点变化,因而通常称之为不可压缩流体。

实际上我们知道任何物体都是由分子组成的,分子之间有一定的间隙,所以严格来说,宇宙间没有完全不可压缩的流体。但是在通常条件下液体是接近于不可压缩的,因而在我们的讨论中一直是把液体作为不可压缩流体来看,只在外力特别大的特殊情况下才计及液体的压缩性。

流体与气体有共同的地方：那就是它們都沒有一定的形状，具有流动性。液体与气体亦有不同的地方，那就是液体不可压缩（一般这样說是允許的）。在容器里边形成一定的自由表面，而气体可压缩，不能形成自由表面。

可以看到，在沒有討論流体的压缩性时，所建立的流体平衡及运动关系既适用于气体亦适用于液体。而后計及压缩性，气体及液体就分別处理了。流体力学、气体力学、水力学之所以相通，其道理也就在这里。

从物理概念来看，流体是由大量分子組成的，显然分子之間有一定的間隙。为了研究方便，在流体力学中我們假定流体不是由分子組成，而是由无限多微小质点所組成的連續介质。流体既然由連續分布着的质点組成，因而其状态参数（如密度、压力、速度等等）就都是空間坐标的連續函数。这样在以后的討論中即可以引用連續函数的解析研究方法来处理流体的平衡和运动状态下的状态参数問題。

但是这样假定与事实是否有出入呢？因为一立方厘米的液体中有  $3 \times 10^{24}$  个分子，一立方厘米的气体中有  $2.7 \times 10^{19}$  个分子，由此可見，分子之間の間隙实在微不足道。在一般工程上有充分根据认为流体是連續介质。

## § 1-2. 密度及重度

流体的第一个物理性质就是它具有质量，用密度表示。

对于均质流体來說，单位体积內所含有的质量叫做密度。

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

式中： $\rho$ —密度；

$V$ —該均质流体的体积；

$M$ —该均质流体的质量。

按力学  $F = Ma$  关系来看, 在工程单位制中质量  $M$  的单位是公斤·秒<sup>2</sup>/米, 因而密度  $\rho$  的单位是公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>。

流体的第二个物理性质就是它具有重量, 用重度表示。

对于均质流体来说, 单位体积内所含有的重量叫做重度。

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (1-2)$$

式中:  $\gamma$ —重度;

$V$ —该均质流体的体积;

$G$ —该均质流体的重量。

在工程单位制中, 重度的单位是公斤/米<sup>3</sup>。

注意, 重度与物理上所熟知的比重是不同的。因为比重的定义是流体的重量与温度为 4°C 时同体积蒸馏水重量之比, 显然, 比重是个无因次的数而重度是个有因次的量。在数值上这二者有一定的关系。因为 4°C 蒸馏水的比重是 1, 而其重度是 1000 公斤/米<sup>3</sup>, 可见在工程单位制中,

$$\gamma = 1000 \times D \text{ 公斤/米}^3, \quad (1-3)$$

式中:  $D$ —表示流体的比重, 是无因次数。

密度和重度之间有一个简单的关系式, 因为重量  $G$  等于质量  $M$  与重力加速度  $g$  的乘积, 即

$$G = Mg,$$

故两边同除以体积  $V$ , 则得

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

式中重力加速度  $g$  在工程单位制中其数值为 9.81 米/秒<sup>2</sup>。

因为当温度不同时, 流体的体积要发生变化, 所以其密度及重度亦是随温度而变的, 表 1-1 中列举出 1 大气压下, 水在不同温度时的密度和重度。

表 1-1. 在 1 大气压下, 水的密度和重度随温度而变化的数值

	水的温度 (°C)							
	0	4	10	20	40	60	80	100
$\gamma$ (公斤/米 <sup>3</sup> )	999.87	1000.00	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.65
$\rho$ (公斤·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup> )	101.92	101.93	101.91	101.75	101.15	100.24	99.08	97.72

从表 1-1 上看到当温度从 4°C 变化到 100°C 时, 水的重度变化约为 4%, 在近似的计算当中, 常取水的重度  $\gamma = 1000$  公斤/米<sup>3</sup>, 这一数据是我们必须时刻牢记的。

在表 1-2 上列举出 1 大气压下常用的几种流体的重度、密度及比重的数值。

表 1-2. 几种常用流体的重度、密度及比重

流体名称	温度 (°C)	重度 (公斤/米 <sup>3</sup> )	密度 (公斤·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup> )	比重
蒸馏水	4	1000	101.93	1
海水	15	1020—1030	103.98—105.00	1.02—1.03
飞机汽油	15	650	66.26	0.65
普通汽油	15	700—750	71.36—76.45	0.70—0.75
石油	15	880—890	89.70—90.72	0.88—0.89
润滑油	15	890—920	90.72—93.78	0.89—0.92
煤油	15	760	77.44	0.76
酒精(乙醇)	15	790—800	80.53—81.55	0.79—0.80
甘油	0	1260	123.40	1.26
水银	0	12600	1386.30	13.6
熔生铁	1200	7000	713.60	7
乙醚	0	740	75.43	0.74
甲醇	4	810	82.51	0.81
苯	0	880	89.70	0.88
空气	0	1.293	0.132	0.001293
空气	20	1.183	0.120	0.001183



### § 1-3. 压缩性及膨胀性

流体的第三个物理性质就是压缩性,即受力作用而体积减少的性质。压缩性的大小用体积压缩系数  $\beta_p$  表示,其定义为增加一单位压力时所发生的体积  $V$  的相对变化量,即

$$\beta_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{p}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \text{ 厘米}^2/\text{公斤}, \quad (1-5)$$

因为  $dV$  与  $dp$  的变化方向相反,压力增加时体积减少,所以式中加一负号。

液体体积压缩很小,例如水的体积压缩系数,当压力:

由 1 到 500 大气压时,其平均值  $\beta_p = 47.5 \times 10^{-6}$  厘米<sup>2</sup>/公斤;

由 1000 到 1500 大气压时,其平均值  $\beta_p = 35.8 \times 10^{-6}$  厘米<sup>2</sup>/公斤;

由 2500 到 3000 大气压时,其平均值  $\beta_p = 26.1 \times 10^{-6}$  厘米<sup>2</sup>/公斤。

故实际上往往把液体看做是不可压缩的,体积压缩系数的倒数叫做体积弹性系数  $K$ , 即

$$K = \frac{1}{\beta_p} \text{ 公斤/厘米}^2, \quad (1-6)$$

表 1-3 中给出水的体积弹性系数随压力和温度而变化的数值。

流体的第四个物理性质就是膨胀性,即当温度升高时其体积增大的性质。膨胀性的大小用体积膨胀系数  $\beta_t$  表示,其定义为增加一单位温度时,所发生的体积  $V$  的相对变化量,即

$$\beta_t = \frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dt}{t}} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} 1/^\circ\text{C}。 \quad (1-7)$$