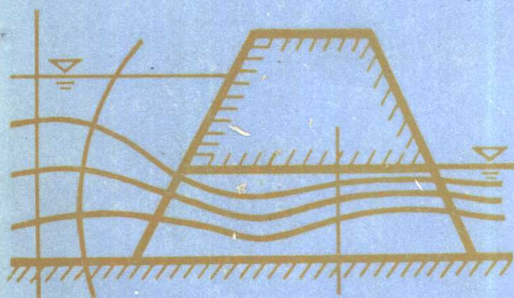


铁路勘测设计基础丛书

水力学基础知识

宋广尧编



中国铁道出版社

水力学基础知识

宋广尧 编

中国铁道出版社

1983年·北京

内 容 简 介

本书是一本介绍水力学基础知识的通俗读物，对液体的基本性能，水的静压、动压等均进行了系统的讲述。同时对于设计涵渠（包括层流、紊流、有压、无压等）及较复杂的消能设施也进行了简明的阐述，可以作为现场有关中级技术人员和中等专业学校师生参考用书。

铁路勘测设计基础丛书

水力学基础知识

宋广尧 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 冯秉明

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张：8.125 字数：186 千

1983年12月 第1版 1983年12月 第1次印刷

印数：0001—10,000册 定价：0.80元

前 言

水力学是应用力学的一部分，是流体力学的一个分支。它是在不断总结生产实践和科学实验的基础上逐渐发展起来的。是应用实验和分析的方法，研究液体运动和静止的规律，以及液体与各种固体边界相互作用关系，并利用这些规律和关系去分析和解决实际工程问题的一门科学。

在铁路、公路与水利等工程建设中，都与水流有着或多或少的联系，尤其对桥涵专业更为密切。因此，水力学已成为土建工程技术人员所共同关心与研究的学科。随着国民经济的不断发展和实现四个现代化的迫切需要，水力学也有了新的发展。

本书是根据编者在多年的教学实践的基础上编写的，初稿曾在中等专业学校作为试用教材和交流讲义使用过。本书在内容上尽量与铁道工程、桥涵与隧道等专业对口，参照中等专业学校教学大纲要求，安排所需的基础知识，以适应具有高中以上文化水平的同志自学水力学。在学完本书之后，读者可以顺利地阅读与水力学有关的专业书籍和提高解决实际问题的能力。本书在编排上也进行了一定的改革，即对各类水力学问题，力求先从工程实际提出问题，再分析水流现象和水力特征，说明水力学概念。然后进行定性分析，从中抽象出水流内在的运动规律，建立相应的公式进行水力计算，以解决实际工程中的水力学问题。这样既便于自学，也有利于培养分析问题和解决实际问题的能力。

本书在编写过程中，曾得到一些科研部门、兄弟院校的指导和帮助；也蒙一些现场单位提供了意见和资料，在此一并表示感谢。

限于编者的水平，缺点和错误在所难免，诚恳地欢迎广大读者批评、指正。

编 者

1983.9.

目 录

第一章 液体的物性与其作用力	1
第一节 液体的主要物理性质.....	1
第二节 作用在液体上的力.....	5
第三节 关于单位制的说明.....	7
第二章 水静力学	11
第一节 静水压强.....	11
第二节 测管水头与静止液体的能量方程.....	28
第三节 作用在平面上的静水总压力.....	31
第四节 物体在液体中的浮沉与稳定.....	39
第三章 水动力学基础	48
第一节 液体运动的描述.....	48
第二节 稳定流的连续性方程式.....	55
第三节 稳定流的能量方程式（伯诺里方程式）.....	58
第四节 水流阻力与水头损失.....	79
第五节 能量方程式的应用举例.....	107
第六节 稳定流的动量方程式.....	112
第四章 有压管流水力计算	122
第一节 概述.....	122
第二节 长管水力计算.....	122
第三节 短管水力计算.....	131
第五章 无压明渠流的水力计算	147
第一节 概述.....	147

第二节	均匀流的水力特征与计算公式	148
第三节	渠道断面设计的水力计算	151
第四节	非均匀流的水力特征与其基本方 程式	162
第五节	非均匀流的水力要素与形态特征	166
第六节	水跌与水跃	179
第七节	非均匀渐变流水面曲线的可能形状	188
第八节	天然河道中洪水流量的计算方法	194
第六章	泄水建筑物的过水能力	201
第一节	闸孔出流的水力计算	201
第二节	堰流的水力计算	205
第三节	小桥水力计算	214
第四节	涵洞水力计算	225
第五节	陡坡小桥涵的水力计算	239

第一章 液体的物性与其作用力

液体是流体的一种，它是由许多流动质点组成的一种连续介质。本书所谈到的“液体”是指对铁路工程关系最为重要的水。

水力学是研究液体机械运动规律的一门科学。液体运动，显然是受外力的推动，但即使外力推动的机械运动，也要通过事物内部的矛盾性起作用。在液体运动中，这一内部矛盾集中反映在液体的物理性质上，而外力推动的机械运动，则是液体上有作用力的结果。因此，在研究液体运动规律之前，我们首先要对液体的物理性质（运动的内因）与作用在液体上的力（运动的外因）有一个总体的认识。

第一节 液体的主要物理性质

液体的主要物理性质有万有引力特性、流动性、粘滞性、惯性和弹性等，下边我们从物理概念上来讨论它的力学性质。

一、万有引力特性

万有引力特性是物体之间相互具有吸力的性质，这个吸力就是万有引力。在工程水力学中，一般只考虑地球对液体的吸引力，也就是液体的重力（或重量），并用 G 来表示。

和其它物体一样，液体具有质量。若液体的质量为 m ，在引力作用下，它便有重量 G ，根据运动定律（牛顿第二定

律) 得

$$G = mg(N) \quad (1-1)$$

式中 g —— 重力加速度, 其值为 9.8m/s^2

液体质量受引力作用而产生的重量, 是液体的一项重要物性指标。工程实践中, 常以单位体积来分析液体的质量与重量。若液体的体积为 V , 故有单位体积所具有的质量称为液体的密度, 以 ρ 表示为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-2)$$

而单位体积的液体所具有的重量称为液体的容重 (亦称重度), 以 γ 表示为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-3)$$

这样, 密度与容重的关系为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-4)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-4')$$

液体的容重随压力和温度的变化而不同, 但在一般情况下, 可视为常数。例如水在一个标准大气压下, 温度为 4°C 时的容重值就作为日常计算值, 即 $\gamma = 9800\text{N/m}^3$, 此时密度为 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 。

二、流 动 性

流动性是液体的重要特征, 也是液体的主要性质, 只有这种内因的存在, 才能使液体在外力作用下通过管道与渠道连续不断地流动。

由于液体具有流动性，使它没有固定的形状，其形体由边界条件来决定。这是因为液体质点之间的内聚力极小，所以液体在很小的切力作用下，便发生变形而流动。正是由于液体的这一特性，说明它只能承受压力，而不能承受任何切力。例如渠道中的水流，如图 1—1 所示，任一点水体 A 受着重力作用，重力 G 是垂直向下的，由于河床倾斜，重力 G

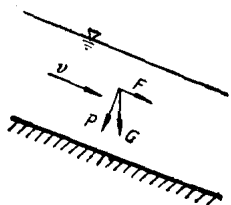


图 1—1

可以分解为垂直河床的正压力 P 和平行河床的切向力 F 。因液体具有不能抵抗切力作用的性质，水质点 A 将沿切力 F 的方向流动，其它水质点的情况与此相同。因此，整个水体皆沿河床的倾斜方向流动。这就说明，液体

因不能抵抗切力而具有流动性。而流动性的根本原因则是由于液体具有质量而产生重力作用的结果。

三、粘 滞 性

我们从实践中可以知道油比水粘，流动起来就要慢些，而到了冬天，油又变得更粘些、流动更慢些，这就从感性上说明了液体的粘滞性。粘滞性不仅与液体的种类还与温度有关，而只有在运动时才表现出来。从力的观点看，液体粘滞性就是相邻两部分液体做相对运动时而产生内摩擦力的性质。这种粘滞性实际就是阻抗运动变形的反作用力。

液体粘滞性是液体运动时产生阻力的根源，因此，要维持液体运动就必须克服粘滞性阻力，从而使液体的能量消耗或转化，这种液体能量的消耗叫能量损失。能量损失是水力学的重要课题之一，因此在以后研究能量损失时，将详细讨论液体的粘滞性问题。

四、惯 性

惯性是物体所具有的反抗改变原有运动状况的物理性质。如果物体不受外力作用（或所受外力合力为零），物体将保持原有静止状态或原有匀速直线运动的状态，这就是物理学中的牛顿第一定律，亦称惯性定律。

液体的惯性，只有在运动状态改变时才显示出来。例如在管流中，突然关闭阀门，使液体速度降为零，从而产生巨大的水锤；水在拐弯或水流边界突然变化时，形成主流与边界分离的运动状态，就是由于水流具有惯性的原因。水的惯性可用它的质量来量度，质量愈大，改变水流原来运动状态愈困难。因此，只有认识了这一惯性的影响，才能进一步领会和掌握各种情况下液体运动的规律。

五、弹 性

弹性是指液体受到压力或温度变化时而产生的液体体积变化的性质。

当温度不变，仅使作用在液体上的压力增加而使液体体积减小的特性，称为“压缩性”。对于水，它能承受压力且对压缩变形有很大的抵抗力。试验证明：每增加一个大气压力时，水的体积只改变万分之零点五。与水相似，其它液体的压缩性也极小，故可认为液体是不可压缩的，液压机械的传动就是利用了液体的这一重要性质。

当压力不变，仅使液体的温度增高而使液体体积增加的特性，称为“膨胀性”。水受温度的影响而膨胀的数值也很小，试验表明：在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时，温度每增加 1°C 时，水的体积只改变万分之一点五，水从 4°C 增加到 50°C 时，其体积相对增大约1%。

在铁路工程中，水的压力 and 温度变化的幅度很少超过上面举例的范围，因而水的体积的微小变化实际上是完全可以忽略不计的。所以一般可认为水是不可压缩的，也不考虑其膨胀性。把水的容重和密度视为不变的常量，即取 $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ 、 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。但在特殊情况下，例如研究有压管路中的水锤现象时，就要考虑水的压缩性；研究供热工程时，才考虑水的膨胀性。

总之，液体的引力特性、惯性和弹性，综合反映了液体的流动性，而粘滞性则反映了液体内部摩擦力以及液体与管（渠）壁的摩擦，所以流动性与粘滞性构成了运动的矛盾统一体。这两方面既相矛盾又相依存，它们对立统一的结果使液体产生运动与相对平衡，这是我们分析液体运动的基本指导思想。

质量力是通过液体质量而作用在其上的力，其大小和所研究的液体质量成比例。在匀质液体中，它和体积成比例，故

又称体积力，常见的体积力有重力和惯性力。

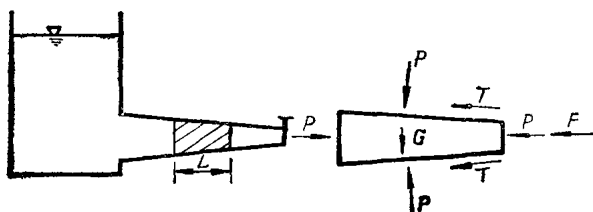


图 1-2

(一) 重力 是地球对液体吸引作用的结果，其大小等于液体的质量与重力加速度的乘积，即 $G = mg$ ，方向垂直向下。

(二) 惯性力 是液体改变速度与方向时所产生的力，它包括做直线加速运动时的直线惯性力和做圆周运动时的离心力。惯性力的大小与质量成正比，根据牛顿第三定律，作用力与反作用力应该相等，改变物体运动状态所遇的反作用力一般称为惯性力，其数值与作用力相等但方向相反。如果物体的质量为 m ，加速度为 a ，则直线惯性力 F 为

$$F = -ma \quad (1-5)$$

液体在运动过程中，若改变其运动状态，无论是加速还是减速都必须克服惯性的影响。当速度与方向改变甚微时，如以后所提到的水流渐变流动，即可忽略惯性力的影响。只当水流做匀速直线运动时，由于 $a = 0$ ，即无惯性力，在此情况下，质量力中只有重力。

在水力学的研究中，质量力在液体的作用力中表现为外力，在外力的作用下，必须通过液体的物理性质而起作用。例如引力作用反映为某一水体体积的重力和水压力等；而惯性作用反映为惯性力或单位时间内动量的变化以及离心力等情况。

二、表面力（面积力）

它作用于液体的表面，其大小与作用面积成比例，故又称面积力，表面力中有压力与阻力。

（一）压力 从图 1—2 中可以看出，所取隔离体液体的四周，因受边界条件的影响，必对隔离体表面有作用力，这就是垂直于作用面上的压力 P ，压力 P 又可分为与水流方向垂直和沿水流方向的二种。

作用于隔离体表面上的压力，本来是液体的内力，由于隔离体是从液体内部取出的，而内力又是成对出现，这时反映在隔离体表面就作为外力来考虑了。因此，内力和外力的区分不是绝对的，是相对于研究问题的范围而言的。

由于表面力实质上是内力，因此常用应力（单位面积上所受之力）来表示。若液体的受压面为 ω ，则单位面积上所受到的压力叫压强，即 $p = P/\omega$ ，而压强 p 视水流运动或静止又有静水压强与动水压强之分。

（二）阻力 即液体的粘滞性阻力，它综合反映于沿作用面方向的切力 T 。若管道周界与水流接触的面积为 A ，则单位面积上所受的切力叫内摩擦力。以 $\tau = \frac{T}{A}$ 表示。由于液体的粘滞性只有在运动时才表现出来，故在静止液体中无粘滞性，表面力中只考虑静水压力一项。

在水力学有关作用力的研究中，重点是讨论压强 p 与阻力 τ 的计算方法，这将在以后的各章中详细叙述。

第三节 关于单位制的说明

所谓单位制是由选定的基本单位和它们的导出单位组成的一系列量度单位的总称。我国过去在工程技术领域中均采

用工程单位制，即重力制，其基本单位如表 1—1。在重力

表 1—1

物理量名称	基 本 单 位	
	工程制（重力制）	国际制（SI）
长 度	米 (m)	米 (m)
质 量	—	千克 (公斤, kg)
力	公斤力 (kgf)	—
时 间	秒 (s)	秒 (s)

制中，质量为导出单位，即 $m = G/g$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)。这个单位制中力的单位尺度公斤力 (1kgf) 定义为：处在纬度 45° 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的重力。故重力制中选择力的单位作为基本单位，并且又是用重力来定义。由于重力加速度随地方而异，因此在不同的地方，物体的重力 $G = mg$ 就有不同的数值，这对贸易上带来了一定的麻烦，因为人类的贸易活动中买卖的应该是质量，并不是地球对它的吸引力，而且重力制对空间技术也是不适合的，它也不便于国家之间的技术交流。因此，在60年第11届国际度量衡会议批准实行国际单位制，并规定 SI 为其国际符号。国际单位制的基本单位亦见表 1—1，它把千克（公斤、kg）作为质量的量度单位。力是导出单位，选取使 1 千克质量的物体能获得 1 米/秒^2 加速度的力作为它的单位尺度，并命名为牛顿，用符号 N 表示，即 $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。若质量 m 为 1kg 的物体，其重力为 $G = mg = 1 \text{ kg} \times 9.800665 \text{ m/s}^2 \approx 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.8 \text{ N}$ ，由此可见两种单位制中力的单位有以下关系

$$1 \text{ kgf} \approx 9.8 \text{ N}$$

由于国际制有许多优点，我国已开始试行国际制。目前也有很多国家积极地推广国际制，连在英制根深蒂固的英国、美国也已采用或向国际制过渡，本书也采用国际制。由于历史的原因，我国目前正处于过渡阶段，尤其专业设备上某些量仍表示工程上的习惯单位，因此必须注意两种单位的换算关系。现将一些和水力学有关的国际单位与工程单位的换算关系列于表 1—2 中。由于长度、面积、速度、加速度、流量等不涉及重量或质量单位，国际制单位和工程制单位都相同，故表中未列。

例 1—1 水和水银在一个工程大气压作用下 20°C 时的容重分别为 $\gamma_{\text{水}}=9.8\text{kN}/\text{m}^3$ 、 $\gamma_{\text{汞}}=133\text{kN}/\text{m}^3$ (国际制) 和 $\gamma_{\text{水}}=1000\text{kgf}/\text{m}^3$ 、 $\gamma_{\text{汞}}=13600\text{kgf}/\text{m}^3$ (工程制)，求水和水银的密度，分别用国际制与工程制表示。

解 按式 (1—4) 计算如下

1. 求水的密度

$$\begin{aligned}\rho_{\text{水}} &= \frac{9.8\text{kN}/\text{m}^3}{9.8\text{m}/\text{s}^2} = 1 \frac{\text{kN}\cdot\text{s}^2}{\text{m}^4} = 1000 \frac{\text{N}\cdot\text{s}^2}{\text{m}^4} \\ &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (\text{SI})\end{aligned}$$

$$\rho_{\text{水}} = \frac{1000\text{kgf}/\text{m}^3}{9.8\text{m}/\text{s}^2} = 102 \frac{\text{kgf}\cdot\text{s}^2}{\text{m}^4} (\text{工程制})$$

2. 求汞的密度

$$\begin{aligned}\rho_{\text{汞}} &= \frac{133\text{kN}/\text{m}^3}{9.8\text{m}/\text{s}^2} = 13.6 \frac{\text{kN}\cdot\text{s}^2}{\text{m}^4} = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &(\text{SI})\end{aligned}$$

$$\rho_{\text{汞}} = \frac{13600\text{kgf}/\text{m}^3}{9.8\text{m}/\text{s}^2} = 1390 \frac{\text{kgf}\cdot\text{s}^2}{\text{m}^4} (\text{工程制})$$

表 1—2

物理量名称	国际制单位和符号	工程制单位和符号	换算关系
质 量	千克 (公斤, kg)	公斤力·秒 ² /米 (kgf·s ² /m)	1kgf·s ² /m = 9.8kg
力、重量	牛顿 (牛, N)	公斤力 (kgf)	1kgf = 9.8N 1N = 1kg·m/s ²
密 度	千克每立方米 (kg/m ³)	公斤力·秒 ² /米 ⁴ (kgf·s ² /m ⁴)	1kgf·s ² /m ⁴ = 9.8kN/m ³
重度 (容重)	牛顿每立方米 (N/m ³)	公斤力/米 ³ (kgf/m ³)	1kgf/m ³ = 9.8N/m ³
压 强	帕斯卡 (帕, Pa)	公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²) 吨/米 ² (t/m ²)	1t/m ² = 9.8kN/m ² 1Pa = 1N/m ²
力 矩	牛顿米 (N·m)	公斤力·米 (kgf·m)	1kgf·m = 9.8N·m
能, 功	焦耳 (焦, J) 牛顿米 (N·m)	公斤力·米 (kgf·m)	1kgf·m = 9.8J 1J = 1N·m
功 率	瓦特 (瓦, W)	公斤力·米/秒 (kgf·m/s) 马力 (HP)	1kgf·m/s = 9.8W 1kW = 102kgf·m/s 1HP = 75kgf·m/s
动 量	千克米每秒 (kg·m/s)	公斤力·秒 (kgf·s)	1kgf·s = 9.8 kg·m/s
动力粘度	帕斯卡秒 (帕·秒 Pa·s)	泊 (P) 公斤力·秒/米 ² (kgf·s/m ²)	1P = 10 ⁻¹ Pa·s 1kgf·s/m ² = 9.8 Pa·s
运动粘度	二次方米每秒 (m ² /s)	斯托克斯, 斯 (St) 平方厘米每秒 (cm ² /s)	1St = 10 ⁻⁴ m ² /s = 1cm ² /s