

—— 高等学校教材 ——

水 力 学

(修 订 本)

上 册

清华大学水力学教研组编

水力学
上册
PDG

高 等 教 育 出 版 社

本书是1961年出版的“水力学”试用教科书的修订本,在修订过程中,根据“少而精”的原则,参照1958年审订的高等工业学校水利类专业适用的“水力学教学大纲(试用草案)”,重新选择了教材内容,压缩了全书的篇幅,作了一次较全面的修改。全书分上下两册出版,除绪论外,共分十三章。上册包括绪论,水静力学,水动力学的理论基础,液流型态、水流阻力和水头损失,有压输水道中的恒定流动,明槽中的恒定流动,河渠泥沙运动的基本原理等六章。下册包括孔口及管嘴出流,堰顶溢流,泄水建筑物下游的水流衔接和消能,渗流,有压输水道中的非恒定流动,明槽中的非恒定流动,波浪理论基础等七章。

本书可作为高等工业学校水利类专业水力学课程的试用教科书,也可作为其他有关专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员参考。

本书由夏震寰、李丕济主编,参加执笔的人有:冬俊瑞、余常昭、周定邦、张永良、曹俊及惠遇甲等同志。

水 力 学

上 册

清华大学水力学教研组编

北京市书刊出版业营业登记证出字第119号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号K15010·1174 开本 350×116 $\frac{1}{2}$ /32 印张 10.1 $\frac{1}{2}$ /16 插页2

字数 271,000 印数 0,001—2,300 定价(7)¥1.30

1965年6月修订第1版 1965年6月北京第1次印刷

序

本书曾于 1959 年出版了上册, 在 1961 年编完了其余部分。全书改分为上中下三册, 作为水力学课程的试用教科书出版。由于教学改革的继续深入, 特别是贯彻“少而精”的原则以后, 对教材提出了更高的要求。为此, 在初版的基础上, 我们进行了全面的修订再版付印, 以便适应当前教学工作的需要。

在本书的修订过程中, 我们力求贯彻理论联系实际和符合学生认识规律的原则, 并对运用辩证唯物主义观点阐述水流现象作了一些尝试。此外, 我们根据“少而精”的原则, 参照了 1962 年审订的高等工业学校本科五年制水利类各专业适用的“水力学教学大纲”(试行草案), 重新选择了内容。但由于全书包括了各专业所需要的内容, 在使用时自应按照各专业的教学大纲的要求, 作必要的取舍。为了分清内容的主次, 将一部分次要内容印成小号字, 便于删减。在文字叙述上, 也力求详略有别, 以示重要性的不同。全书篇幅也加以控制, 力求份量适中。

修订工作中, 虽对上述原则作了努力, 但限于我们的水平, 体现得还很不够, 也会存在不少缺点。尤其是教育革命进一步深入开展以后, 更会有较大的差距。希望有关同志多提意见, 以便将来作进一步的改进。

修订版分上、下两册。上册包括绪论、水静力学、水动力学的理论基础、液流型态及水头损失、管路及明槽的恒定流动以及泥沙运动的基本原理等六章。下册包括孔口管咀、堰流、衔接消能、渗流、有压及无压的非恒定流动以及波浪理论基础等七章。

修订工作系在教研组的实践教学的基础上, 通过集体讨论, 分

工执笔,再由主编审订的方式完成的。参加执笔的有冬俊瑞,李丕济,余常昭,周定邦,夏震寰,张永良,曹俊及惠遇甲等,由夏震寰,李丕济主编。

修订稿蒙武汉水利电力学院张瑞瑾同志审阅,水力学课程教材编审小组审查,并提供了许多宝贵的改进意见及建议。此外,各院校的有关教研组也提供了许多有益的意见,特此一并致谢。

编 者

1964 年 12 月



上册目录

序	v
绪论	1
§ 0-1. 水力学的定义及其在水利建设中的任务	1
§ 0-2. 水力学的发展简史	3
§ 0-3. 液体的主要物理性质及其相应的作用力	7
§ 0-4. 水力学的研究方法	15
第一章 水静力学	19
§ 1-1. 静水压强及其特性	19
§ 1-2. 液体的平衡方程	21
§ 1-3. 重力作用下的液体平衡	25
§ 1-4. 在两种质量力作用下的液体平衡	31
§ 1-5. 液体压强的量测	33
§ 1-6. 作用于平面上的静水总压力	38
§ 1-7. 作用于曲面上的静水总压力	44
§ 1-8. 浮力和浮体的稳定	48
第二章 水动力学的理论基础	55
§ 2-1. 描述流动的方法	55
§ 2-2. 液体质点运动的基本形式	62
§ 2-3. 有势流动和有涡流动	66
§ 2-4. 连续原理	71
§ 2-5. 液流的运动方程	74
§ 2-6. 运动方程的积分	79
§ 2-7. 实际液流的能量方程	88
§ 2-8. 液流的动量定律	99
§ 2-9. 恒定平面势流	105
§ 2-10. 液流的相似原理	115
§ 2-11. 气穴和空蚀	124
第三章 流动型态·水流阻力和水头损失	129
§ 3-1. 流动的两型态	129
§ 3-2. 紊流运动	135
§ 3-3. 边界层理论基础	146
§ 3-4. 水流阻力及水头损失的种类	151
§ 3-5. 沿程水头损失与切应力的关系	154
§ 3-6. 圆管层流的水头损失	157

§ 3-7. 紊流沿程水头损失的分析	160
§ 3-8. 计算沿程水头损失的经验公式	171
§ 3-9. 局部水头损失	177
§ 3-10. 绕流阻力	185
第四章 有压输水道中的恒定流动	188
§ 4-1. 概述	188
§ 4-2. 简单管道输水能力的计算	190
§ 4-3. 管道中水流压强的沿程分布	195
§ 4-4. 复杂管道的水力计算	203
第五章 明槽中的恒定流动	210
§ 5-1. 概述	210
§ 5-2. 明槽中的均匀流动	213
§ 5-3. 明槽水流的流动状态	223
§ 5-4. 明槽水流的断面单位能量、临界水深、临界坡度	228
§ 5-5. 明槽水流流态转换时的局部水力现象——水跃和跌水	235
§ 5-6. 明槽中恒定非均匀流动的基本方程式	244
§ 5-7. 棱柱形明槽中恒定非均匀渐变流水面曲线型式	249
§ 5-8. 明槽恒定非均匀流动水面曲线的计算和绘制	260
§ 5-9. 河道中水面曲线的绘制	278
§ 5-10. 两水库间连接渠道的输水能力	286
§ 5-11. 弯曲河段的水流运动	291
§ 5-12. 河道水流流动图形的绘制	295
第六章 河渠泥沙运动的基本原理	301
§ 6-1. 概述	301
§ 6-2. 泥沙的特性及其运移方式	302
§ 6-3. 推移质运动	305
§ 6-4. 悬移质运动	313
附录	322
I. 给水管道的流量模数 $k = \omega c \sqrt{R}$ 数值	322
II. 系数 C 值表(根据曼宁公式)	323
III. 系数 C 值表(根据巴甫洛夫斯基公式)	324
IV. 梯形断面河槽正常水深求解图	(插页)
V. 梯形、矩形、圆形断面明槽中的临界水深求解图	(插页)
VI. 梯形断面槽水跃共轭水深求解图(由 h' 求 h'')	(插页)
VII. 梯形断面明槽水力指数 x_0 求解图	(插页)
VIII. 梯形断面明槽水力指数 y_0 求解图	(插页)
IX. 正底坡棱柱形槽非均匀流函数表	325
X. 反底坡棱柱形槽非均匀流函数表	334

結 論

§ 0-1. 水力学的定义及其在水利建設中的任务

水力学是根据生产实践的要求,研究液体机械运动的规律,并提供解决实际问题的具体方法的一门科学。

水力学是介乎基础科学和工程技术之间的一门技术科学。一方面根据基础科学的普遍规律来建立理论基础,有着比较完整的科学体系;另一方面根据工程技术的实际要求来发展学科内容,与实践有着紧密的联系。

水力学在水利工程建设中应用比较广泛。进行水利建设就是通过修建水工建筑物及整治河床等措施来控制边界条件,调整和改变原有的水流状态,使其符合人们的需要。同时,水流也力图反抗边界的约束,两者相互作用而形成新的水流状态。水力学在水利建设中的任务就是:深入研究水流与边界(水工建筑物及河床等)的相互作用,分析在各种相互作用的条件下所形成的各种水流现象和边界上所受的各种力的作用,为水利工程的勘测、规划、设计、施工和运转管理提供足够的水力学依据。例如,人们常在河中筑坝形成水库来调节洪峰、储蓄水量和集中落差,以满足防洪、灌溉和发电等方面的需要,有时还利用坝身作为溢洪道,从坝顶溢流来宣泄洪水,以保证坝体的安全。筑坝后就改变了原有的水流状态,水流不是顺河床下泄,而是蓄积于水库中,并在装满水库后从坝顶溢流,泄入下游河床。同时,水流对坝体也作用有巨大的水压力,力图推倒坝体,维持原有的运动状态,并在水压力的作用下,无孔不入地向坝基和两岸渗流。另外溢流水股对坝体也有作用力,下泄的高速水流还常在下游河床造成冲刷。要正确地进行坝

的设计,满足工程要求,并保证结构物的安全,就必须分析水流与边界的相互作用,确定水库水位及坝体所受的水压力,坝体的溢流能力及下泄的水流对坝体和下游河床的作用,渗流的运动状态及其对建筑物的作用等。

在水利工程的实践中,所提出的水力学问题主要有下列四个方面:

(一) 过水能力 研究水工建筑物(及河床)在各种水流条件下的过水能力及其影响因素,并探讨如何提高过水能力,例如研究管道、闸孔的过水能力等。

(二) 水力荷载 研究水工建筑物(及河床)在各种水流条件下所受的水力荷载及其所引起的作用,并探讨如何减小荷载的不利作用和加强荷载的有利作用,例如研究闸坝所承受的静水压力和动水压力等。

(三) 水能消耗 研究各种情况下水流通过水工建筑物(及河床)时所引起的能量损失,并探讨如何减少有效能量的损耗和加大多余能量的消毁,例如减少管道流动的能量损耗和加大泄水建筑物下游的水流余能的消毁等。

(四) 水流性态 研究各种情况下水流通过水工建筑物(及河床)时的流动形态及其对工程的影响,并探讨如何进行改善的问题,例如河流中的主流位置,回流的范围和强度及其对河岸或河床的冲刷和淤积的影响等。

上述四个方面不是互不相关、截然分开的,而是水流与边界的相互作用从不同角度的反映,是彼此紧密联系着的。

要注意的是水力学的任务不仅是认识水流规律,更重要的是要利用水流规律来为修建水工建筑物和整治河床提供水力学依据。当然也要注意水利工程是一个复杂的综合体,影响因素很多,只依据水力学是不能解决的,必须根据国家的方针政策,从政治、

经济和技术各个方面全面考虑才能解决。即使从技术方面来看,除了水力学问题以外,也还有地质、地形、结构、材料和施工等各种问题,必须进行全面分析才行,力忌单纯运用水力学的观点去观察和解决复杂的水利工程中的实际问题。

水力学不但在水利建设中有着广泛的应用,而且在很多国民经济部门像城市建设、机械制造、石油开采、金属冶炼和化学工业等都有大量的液流现象,要顺利地解决这方面的问题,也都需要有相当的水力学知识。

§ 0-2. 水力学的发展简史

水力学的发展可以追溯到很早的时候。远在几千年以前,由于防洪、灌溉的需要,人们就开始与水打交道。我国广为流传的四千多年前“大禹治水”的传说,就是我国古代大规模治水斗争历史的反映。通过斗争,人们开始建立对水流运动的朴素认识。例如我国人民就早已注意到水流运动具有规律性,并提出要治水就必须注意“顺水之性”的卓越见解。

但是,作为水力学系统理论的萌芽,那是开始于公元前三世纪。当时希腊正处于奴隶社会,生产力有较大的发展,古希腊的刚体静力学和欧氏几何此时也有相当的发展。在此基础上,于公元前 250 年左右,提出了浮体的阿基米德定律。

以后一直到公元十五世纪,水力学在系统理论上的进展就很少,主要是积累了很多水流运动规律的感性认识,并应用来解决很多实际问题。当时欧洲一直处于“黑暗的”中世纪,封建和神权占统治地位,生产力发展很慢,并且深受“经院哲学”的思想影响,严重地阻碍了科学的发展。我国在十五世纪的明朝以前对于水流运动规律已有相当深刻的认识,一直是位于世界先进的行列。等到欧洲资本主义兴起,才逐渐相形落后。由于近几百年的反动封建

统治使我国的科学得不到应有的发展，水力学也始终处于概括的定性阶段而未能形成严密的科学理论。

我国古代水利建设有着辉煌的成就。随着生产的发展，对于水流运动规律已有一定的认识和具体的运用。两千多年前修建都江堰工程时所总结的“深淘滩，低作堰”，就反映出当时对明渠水流和堰流已有一定的认识。关于孔口出流也很早就有相当的认识，并能应用来解决一些实际问题。例如我国古代计时工具——铜壶滴漏就是利用孔口出流使受水容器的水位发生变化来计算时间的。通过长期的治水斗争，我国对于水流与泥沙的相互作用也有相当深刻的分析，并曾提出过“筑堤束水，以水攻沙”等精辟的见解。此外，我国古代人民很早就懂得利用水流冲力来带动机械，并发明了很多的水力机械。由此可知我国人民很早就积累了相当丰富的水力学知识，如果没有封建社会的阻碍，在水力学的系统理论上也一定能作出卓越的贡献。

水力学的进一步发展是在十六世纪以后。当时资本主义的因素已相继在意大利、英国等西欧国家萌芽兴起，生产力有了很大的提高，并在城市建设、航海和机械工业等发展需要的推动下，逐步形成了近代的自然科学。水力学也随之而得到发展。这时水静力学借助于刚体静力学的发展进一步得到完善。水动力学也在一般动力学的科学基础上开始发展起来，取得一些成果，并在1686年引入粘滞性的概念，提出了牛顿的液体内部摩擦力假设。但是水动力学的系统理论是在十七世纪末叶建立了古典力学的完整体系和能描述运动变化过程的微积分以后才形成的。

十八世纪中叶以后，英国首先开始工业革命，以后在法国、德国和俄国等也陆续兴起，生产力得到前所未有的发展。近代工业的发展促进了科学的繁荣。水力学也在这个时期开始形成一门独立的学科，并沿着古典流体力学与实验水力学两个互不联系的方

向发展。

古典流体力学是在古典力学的基础上,运用严密的数学分析工具,发展成为力学的一个独立分支。1738年建立了水动力学的伯诺里方程式,1755年建立了理想流体的欧拉微分方程式,以后还提出了适用于连续介质的动量定理和动量矩定理,这样就奠定了理想流体动力学的巩固基础。此后,古典流体力学一方面进一步发展了理想流体动力学,另一方面就是研究实际粘滞流体,并在1843年建立了粘滞流体的纳维埃-司托克斯微分方程式。古典流体力学为水力学的长远发展奠定了理论基础,但由于其假设与实际还有相当距离,或者由于求解上的数学困难,还难于运用来解决很多实际问题。

为了适应当时工程技术急剧发展的需要,实验水力学就逐渐形成。它不追求完整的理论体系,而是通过统计分析大量实验观测资料,直接求得水力要素间的定量经验关系,着眼于解决工程实际问题。当时主要研究的是水利工程等生产实践中所经常遇到的如管、渠、孔和堰等比较简单的典型水流运动,并得到了很多经验公式。如1755年提出的均匀流的谢才公式和后来为计算谢才系数所提出的曼宁经验公式,还有很多管流、堰流和孔口出流的经验公式等。实验水力学不但适应了当时的迫切需要,也为今后的理论概括准备了条件。不少经验公式目前仍在运用,并且有的已具有新的理论涵义。但是,实验水力学由于缺乏理论指导,其成果也有局限性,还难于解决复杂的问题。理论与实践紧密结合,改变古典流体力学与实验水力学相互脱节的情况,这是发展的必然趋势。

十九世纪末叶,现代工业和新技术的迅速发展,特别是二十世纪以后社会主义制度的建立和发展,为生产力和科学的发展开辟了新纪元,水力学的发展也进入了一个新时期。

首先,理论与实践的结合日益紧密,古典流体力学与实验水力

PDG

学在新的基础上形成了理论流体力学与应用流体力学两个相互补充日益结合的发展方向。这个时期生产技术的发展,向古典流体力学提出了很多实际课题,要求密切联系实际,也对实验水力学提出了更高的要求,必须进行理论概括。同时,科学技术的发展也为理论与实际的结合创造了良好的条件。一方面紊流和边界层等理论的发展已经深入到水流的内部机理,为分析复杂的实际粘滞流体的运动开辟了道路。紊流理论是在1883年系统地研究了层流和紊流两种流态,以及1884年推导了紊流运动的雷诺方程式之后奠定科学基础的。边界层理论是在1904年比较完整地提出来的,目前已有广泛的应用。另一方面迅速发展的现代实验技术和建立在相似理论及量纲分析基础上的现代实验理论,也大大提高了探测自然的能力和对试验观测资料进行理论概括的能力。相似理论和量纲分析目前都已有一套比较完整的理论。在水力实验技术上,目前也已采用了很多电子仪器、同位素和半导体等现代量测技术,并正在继续迅速向前发展。

其次,研究领域也大为扩展深入,不但原有的研究课题内容日益丰富,并且还派生出来很多新的学科。这个时期由于航空技术等现代工业的发展,已形成了不少研究流体运动的新学科,像空气动力学、气体动力学、电磁流体力学和稀薄气体力学等。这些新学科的发展,不但扩大了流体运动的研究领域,而且也有助于水力学的发展。水力学本身由于工程技术的发展也形成了很多专门的分支,其中与水利建设紧密联系的以修建水利工程中所遇到的水流现象作为研究对象的水工水力学,就是在大规模水利建设的推动下形成和发展起来的。水工水力学不仅进一步研究了管、渠、孔和堰等比较简单的典型水流现象,同时对于非均匀流、非恒定流、消能衔接、泥沙运动和渗流等比较复杂的水工专门问题也作了比较系统的研究。

解放前长期的反动统治，使我国的科学技术长期处于落后状态，水力学的情况也是一样。1949年中华人民共和国成立，为我国的生产发展和科学繁荣开辟了新纪元。在这短短的十五年中，在水力学方面结合水利建设的需要进行了大量的实验工作和理论研究，不但解决了很多实际问题，而且对于水流消能衔接、高速水流、非恒定流以及泥沙运动等各个方面的研究工作都取得了一定的成果，配合以上的工作还进行了不少长期的实地观测。解放后我国水利事业发展的规模和速度都是古今中外少有的。在总路线的光照耀耀下，在“以农业为基础，以工业为主导”的发展国民经济的总方针的指导下，我国的水利事业将会得到更加迅速的发展。这个巨大规模的水利建设就是我国水力学得以迅速发展的根本源泉。同时在解放以后，又红又专的水利科学技术队伍的成长和全国规模的水利科学研究网的形成，都为我国水力学的长远发展奠定了坚实的基础。我们深信在党的领导下，随着祖国建设事业的蓬勃发展，有着悠久治水斗争历史的勤劳勇敢而智慧的中华民族，将在整个水力学的长远发展上起着愈来愈重要的作用。

从以上概括的历史叙述中，可以看出来水力学是一门古老而又年轻的科学，它有着悠久的历史 and 光辉的未来。水力学的发展是与社会生产特别是与水利事业的发展密切相关的。它的发展决定于社会生产力的水平，并受当时有关的科学技术特别是数学、物理、力学和实验技术的发展水平所制约。另外，时代的哲学思想对它也有很大的影响。同时水力学理论的发展，反过来也对生产的发展和有关的科学技术的进步起着积极的推动作用。

§ 0-3. 液体的主要物理性质及其相应的作用力

液体的基本特征是具有易流动性和不易压缩性，并能形成自由表面。液体与气体一样几乎不能承受拉力抵抗拉伸变形，静止

时也不能承受切力抵抗剪切变形,因此不像固体那样自己能保持一定的形状,而是很容易流动的。液体与固体一样能承受压力,并且对于压缩变形有很大的抵抗能力,很不容易被压缩,而气体就很容易被压缩。液体的体积有一定大小,不像气体那样能充满任何容器,液体可能有自由表面。

液体的真实结构是由彼此之间有空隙并在进行着复杂的微观运动的大量液体分子所组成的聚集态。但是详细研究分子的微观运动,不是水力学的任务,我们关心的不是个别分子的微观运动,而是整个液流的宏观机械运动。所以在水力学中引入了液体具有连续性的假设:认为液体是彼此之间没有空隙存在,完全充满所占空间,并且由没有微观运动的无数液体质点所组成的连续介质,其物理性质和运动要素都是连续变化的。这样就能摆脱复杂的分子运动,而着眼于工程实际所关心的宏观机械运动,并能充分利用连续函数这一有力的工具,应用上既很方便又有足够的精确性。当然连续性的假设也有其应用的范围,当研究的区域很小与分子的大小处于同一数量级时,或者在很稀薄的气体中连续性的假设就不再合适,而必须考虑为不连续体;另外当液体性质有局部突变时连续性的假设也不合适,例如液流中局部地区的压强很低发生气化现象形成气穴时,就会破坏液体的连续性。最后要说明的是虽然认为液体是连续介质,不研究微观的分子运动,但分子运动实际上是存在的,其影响也是不能忽略的,因而必须在液体的物理性质中加以考虑。

在连续性假设的基础上,水力学中一般都认为液体具有均匀等向性:液体是均质的,各部分和各方向的物理性质是一样的。

总之,在水力学中液体就是容易流动的、不易压缩的、均匀等向的连续介质。水力学中的研究成果可以应用于以水为代表的一般液体和可以忽略压缩性影响的气体。

上面综合讨论了水力学中的液体基本概念, 下面再进而分别讨论与水力学有关的液体的几种主要的物理性质及其所引起的作用力。

(一) 惯性

惯性就是物体所具有的反抗改变原有运动状态的物理性质。惯性的度量就是质量, 质量愈大惯性也愈大。当物体受其他物体的作用力而改变运动状态时, 此物体反抗改变原有运动状态而作用于其他物体上的反作用力称为惯性力。若物体的质量为 M , 加速度为 a , 则惯性力 F 的数值为

$$F = -Ma. \quad (0-1)$$

负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。

液体单位体积内所具有的质量称为密度 ρ , 对于均质液体若其体积为 V , 质量为 M , 则

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (0-2)$$

对于非均质液体, 根据连续性的假设, 则

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}, \quad (0-3)$$

ρ 的物理单位为克/厘米³, 工程单位为公斤-秒²/米⁴。

液体的密度随压强和温度而发生不大的变化, 一般可看作为常数。在实用上, 水的密度就以在一个大气压强下温度为 4°C 时的最大密度值作为日常计算值, 其数值为 1 克/厘米³ 或 102 公斤-秒²/米⁴。

(二) 万有引力特性

万有引力特性是物体之间相互具有吸引力的性质。这个吸引力就是万有引力, 其作用是企图改变物体原有的运动状况而使其相互接近。在液体运动中, 一般只需要考虑地球对液体的引力, 也

就是重力，并用重量来表示。若物体的质量为 M ，重力加速度为 g ，则重量为

$$G = Mg. \quad (0-4)$$

液体单位体积内所具有的重量称为容重 γ ，对于均质液体，若其体积为 V ，重量为 G ，则

$$\gamma = \frac{G}{V}. \quad (0-5)$$

对于非均质液体，根据连续性的假设，则

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V}. \quad (0-6)$$

γ 一般都用工程单位公斤/米³表示。又从公式 (0-2)、(0-4) 和 (0-5) 可知

$$\gamma = \rho g \text{ 或 } \rho = \frac{\gamma}{g}. \quad (0-7)$$

g 一般可看作为常数，并采用 9.80 米/秒² 的数值。

液体的容重虽随压强和温度而不同，但在一般情况下，可看作为常数。水在一个大气压强下，温度为 4°C 时的容重值就作为日常计算值，其大小为 1000 公斤/米³。

(三) 粘滞性

液体具有易流动性，静止时不能承受切力抵抗剪切变形。但是在运动状态下，液体就具有抵抗剪切变形的能力，这就是粘滞性。在剪切变形的过程中，液体的粘滞性使液体内部出现成对的切力（也称为内摩擦力），其作用是抗拒液体内部的相对运动，从而影响液流的运动状况。液体的粘滞性也是液体中发生机械能量损失的根源。

由牛顿在 1686 年首先提出的，并经后人加以验证的液体内摩擦定律可表述如下：在液体的二元平行直线运动中，内摩擦力（或

切力) F 的大小与液体的性质有关, 并与流速梯度 $\frac{du}{dn}$ 和接触面积 ω 成正比, 而与接触面上的压力无关。这个定律可表达如下:

$$F = \mu \omega \frac{du}{dn}. \quad (0-8)$$

式中 μ 为比例系数, 称为粘滞系数, 其工程单位为公斤·秒/米², 物理单位为达因·秒/厘米², 又叫泊。1 泊相当于 0.102 公斤·秒/米²。若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力即切应力, 则

$$\tau = \mu \frac{du}{dn}. \quad (0-9)$$

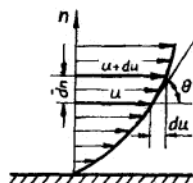


图 0-1

必须注意的是 τ 与 F 是成对出现的, 数值相等、方向相反。运动较慢的液层作用于运动较快的液层上的切力, 其方向与运动方向相反, 并使运动减慢; 运动较快的液层作用于运动较慢的液层上的切力, 其方向与运动方向相同, 并使运动加快。

式(0-9)中的流速梯度 $\frac{du}{dn}$ 实际上就表示液体质点的剪切变形的速度, 这可阐明如下:

为了便于说明起见, 取一方形质点如图 0-2 中的实线所示。经过 dt 时间以后, 由于各层流速不等, 该质点将成为图 0-2 中的虚线的形状和位置。这时质点的剪切变形为 $d\alpha$,

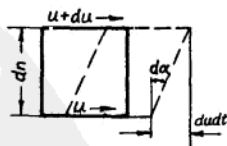


图 0-2

$$d\alpha = \frac{du dt}{dn},$$

因此单位时间的剪切变形 $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dn}$ 。从此我们得出一个有关液体的重要特点: 液体中的切应力与剪切变形的速度成比例, 而在固体