

水力学和水力机械

苏联烏根秋斯著

(农机专业用)

沈阳农学院

目 录

緒 論	1
第一部分 水力学	
第一章 流体的物理性質及最主要的定义	5
1-1. 流体最重要的物理性質	5
1-2. 理想液体的概念	10
1-3. 气体物理性質的簡述	11
1-4. 水力实验在解决工程水力学各种問題中的作用	12
第二章 水静力学	13
2-1. 水静压力及其特性	13
2-2. 水静力学基本方程式	16
2-3. 水静压力圖	17
2-4. 测压管, 計示高度和真空的概念	20
2-5. 基准面, 能头和能头面, 液体的自由液面	21
2-6. 測量压力的仪器	24
2-7. 水静力学的一般微分方程式	28
2-8. 水静力学的一般微分方程式在某些特殊情况下的应用	31
2-9. 連通器中液体的平衡条件	32
2-10. 气体的平衡条件	34
2-11. 液体的相对靜止	35
2-12. 巴斯德定律及其实际应用	43
2-13. 平面上总水静压力的計算	46
2-14. 曲面上的液体压力	50
2-15. 阿基米德定律。物体懸浮的理論	54
第三章 水动力学的基本概念	58
3-1. 运动的分类	58
3-2. 液体流束狀运动的状态	59
3-3. 有效断面及流量	60
3-4. 水力坡, 几何坡及計示坡	62
3-5. 液流連續性原理	63
第四章 理想液体运动的微分方程式	64
4-1. 理想液体运动的微分方程式	64
4-2. 理想液体的連續性微分方程式	66
4-3. 緩变流动时实际液流中水动力压力的分布	68

第五章 液体运动方程式.....	69
5—1. 用运动微分方程式推导理想液体微小流束的伯努利方程式.....	69
5—2. 用动能定律推导理想液体微小流束的伯努利方程式.....	72
5—3. 伯努利方程式的几何意义及物理意义(能量意义).....	74
5—4. 实际液体微小流束的伯努利方程式.....	77
5—5. 实际液体全液流的伯努利方程式.....	81
5—6. 伯努利方程式的实际用途.....	84
第六章 粘性液体的两种运动状态.....	88
6—1. 确定液体两种运动状态的雷诺兹实验.....	88
6—2. 雷诺兹数及临界流速.....	90
6—3. 水动力相似的概念及相似准则.....	93
6—4. 滑润水动力学理论.....	98
第七章 管中液体流动的理论.....	101
7—1. 均匀流动基本方程式的推导.....	101
7—2. 管中液体的层流状态.....	104
7—3. 管中液体的紊流状态.....	107
7—4. 紊流状态时管中的能头损失.....	111
7—5. 紊流状态时管中能头损失的计算公式.....	115
7—6. 局部阻力区的能量损失.....	118
7—7. 管系的阻力系数.....	121
7—8. 苏联学者及科学研究机关研究管中液体流动的工作情况.....	122
第八章 管路的水力计算.....	125
8—1. 管路的水力计算基础.....	126
8—2. 简单管路的水力计算.....	131
8—3. 复杂管路的水力计算.....	135
8—4. 三容器问题.....	139
8—5. 短管及虹吸管的水力计算.....	141
8—6. 管中水锤.....	143
8—7. 管路的技術經濟計算基礎.....	148
第九章 孔口与管嘴的液体出流, 堰的液体溢流.....	151
9—1. 孔口的分类及出流的基本特征.....	151
9—2. 薄壁孔口的液体出流.....	152
9—3. 管嘴。分类及应用范围.....	156
9—4. 管嘴的水力计算.....	158
9—5. 能头变化时的液体出流.....	162
9—6. 堰.....	164
第十章 明渠中液体的均匀流动.....	167
10—1. 明渠的水力计算.....	167
10—2. 渠道的水力最佳断面.....	169

第十一章	液流与固体的相互作用	170
11—1.	射流与固体障碍物間的作用与反作用	170
11—2.	液体相对运动的伯努利方程式	173

第二部分 水力机械

第十二章	水力机械基本概念	176
12—1.	水力机械的职能及其分类	176
12—2.	叶片式机械的作用原理。叶片式机械基本方程式的推演	176
12—3.	水力机械發展簡史	178
第十三章	泵的基本概念	180
13—1.	泵的用途及其分类	180
13—2.	应用在泵理論中的基本定語	180
第十四章	离心式泵	183
14—1.	离心式泵的分类	183
14—2.	离心式泵的裝置及作用原理	184
14—3.	离心式泵的基本方程式	187
14—4.	势压头及动力压头的反力系数	191
14—5.	叶片形式及其对泵运行时的影响。導水翼	192
14—6.	离心式泵的相似	193
14—7.	比速系数	196
14—8.	离心式泵的特性曲綫	200
14—9.	离心式泵結構示例	203
14—10.	离心式泵在管網中的运行。泵的串联及并联运行	207
第十五章	活塞式泵	209
15—1.	活塞式泵的作用原理及其分类	209
15—2.	活塞式泵的抽液率(排液量)	211
15—3.	空气室裝置	216
15—4.	吸液及压液过程	219
15—5.	指示功及有效功率的示功圖	224
15—6.	活塞式泵的結構及其某些零件的示例	227
第十六章	迴轉式泵、液压傳动	232
16—1.	迴轉式泵的概念	232
16—2.	液压傳动的应用范围, 工作原理	234
16—3.	液压傳动机構的各种調節方法的示例	235
第十七章	水輪机	236
17—1.	水輪机的用途。水輪机的分类	236
17—2.	水輪机的基本方程式。比速系数。水輪机的标准名称	241
附 錄		244
中俄名詞对照表		250

緒 論

研究液体平衡及运动的規律以及在不同的工程实用部門中应用这些規律的方法的实用工程科学称为水力学。水力学中研究液体平衡規律的部分称为水静力学；研究計及液体內部作用力的液体运动規律的部分則称为水动力学。

本門課程供給机械制造各專業学生之用，其任务在于叙述水力学的原理（第一部分），这些原理是在學習若干專業課程某些必須应用水力学基本規律及方法的章節中所必需的。因此需要簡述一下水力学对机械專業工程师的意义，并指出机械工程师需要应用水力学基本規律及各种水力学公式的技術部門。

首先必須指出水力学的的基本規律已最广泛地应用在近代的叶片式泵及水輪机的理論上。譬如，相对运动伯努利方程式广泛地应用在叶片式泵的理論上以分析动輪內液流的运动条件。同样，伯努利方程式亦用以研究叶片式泵及水輪机的气蝕現象，以决定上述离心叶片式机械的極限吸水高或动輪的極限轉数。

流自管嘴并作用在固定障碍物（輪叶）上的射流的动力特性是冲击式水輪机的工作原理。射流对容器的反作用是用来解釋反击式水輪机工作的水力原理。应用在叶片式水力机械中的动力相似理論是解决制造新型机械及改進其旧有構造等复雜問題上的最有力工具。

水錘理論被广泛地应用在水管及用来防止水錘的安全裝置的設計上，同时也用来設計水錘揚水机。

水压机、水力起重机、水力联軸器、水力掣动器以及类似这些的裝置，都是以水靜压力在液体內部傳遞的規律为基础的。在这个規律上还建立了用以調整近代机床工作的傳动理論。浮桥、浮标、水上飛機及其他浮具的穩性計算，以及气化器的浮子裝置等都是建筑在物体懸浮的理論基礎上。

飛機飛行时作用在汽油槽壁上的汽油压力、火車行駛时液体作用在运油槽壁上的压力及其他等等，都是根据液体相对靜止的方程式來計算的。

确定輸油管及水冷却系統的主要尺寸，各种噴射器及管嘴基本尺寸、計算射流泵、气化器等等，所有这些都需要应用水力学的的基本規律及方法：如伯努利方程式、液体均匀流动方程式、計算局部阻力的关系式及計算孔口和管嘴液体出流的公式等。

以上所列举的远不是实际問題中的全部，但僅就这些問題就已經关系到一些不同机械專業的机械工程师了。这足以說明水力学在机械制造工業上的巨大意义及其与机械範圍內其他課程的紧密联系（如泵与水輪机、水压机及蓄能器、机床制造的水力傳动、測压仪器、汽車与拖拉机、掣动器、水力潤滑、飛機与水上飛機的某些部件之計算、原动机某些部件的計算等等）。

本教科書的第二部分——水力机械——在極大程度上以本課程第一部分（水力学）的材料为基础。这部分的目的是在于講述水力机械的理論与結構的概念。

为了認識所研究的現象，找出它們發生的原因以及它們流动的条件，在水力学中广泛地应用着理論的以及实验的研究方法。除此以外，在水力学中为了求得近似的結果还广泛地应

用着研究的簡化方法，这些近似結果有时在解决工程实际問題上是特別需要的。

水力学的理論基礎是由过去一門純理論的科学——流体力学——中得來的，流体力学是以嚴謹的数学方法来研究液体平衡及运动的規律，以求得水靜力学及水动力学中各种問題的一般解答。長时期以來流体力学主要是在研究理想液体（即某种假設的液体，認為它是絕對不可壓縮的、質點具有絕對流动性的、沒有粘性和对拉力无抵抗的液体）。近來流体力学才开始解决粘性（实际）液体的运动問題，因此实验在流体力学中的作用显著地增長了。水力学和流体力学曾長期各自地發展着，但是近來已日趋一致，正象当时Н.Н.巴甫洛夫斯基（Н.Н.Павловский）院士曾指出过：“这二門科学将归併为一，在这門科学中流体力学帶來了理論的嚴謹性和对研究的完整性，而水力学則帶來了生动与实用的精神”。

現在來簡單地敘述一下水力学的發展史，至于水力机械制造的發展史将于教科書的第二部分〔水力机械（12—3）〕來敘述。

远在阿基米德〔Архимед（公元前250年）〕、达·芬奇〔Леонардо Да-Винч（1452—1519）〕、伽利略〔Галилей（1564—1642）〕及牛頓〔Исак Ньютон（1642—1726）〕时代就解决了水力学上某些个別的問題，然而水力学僅僅在俄國科学院院士伯努利〔Даниил Бернулли（1700—1782）〕及欧勒〔Леонард Эйлер（1707—1783）〕奠定了成为水力学理論基礎的液体运动的基本規律后，才开始成为一門独立的科学。

偉大的俄國学者М.В.罗蒙諾索夫〔М.В.Ломоносов（1711—1765）〕在1748年發現了能量守恒定律后，才使著名的伯努利方程式有着研究的可能性，因为伯努利方程式是能量守恒定律应用在运动液体上的一个特殊情况。

伯努利及欧勒的研究工作是水力学發展成为一門独立科学的重要階段，在他們之后，这种研究仍然在繼續着和擴展着，到二十世紀初叶止，水力学的根本問題是：紊流問題，粘性液体运动阻力的一般規律之研究，管子、渠道及水堰中的液流运动之研究，管中水錘及局部阻力能量損失之研究，多孔介質中的液体滲透問題，因次分析及相似理論的研究等等。在研究中特別注意了实验室的实验工作。

俄國学者当时在解决上述最重要的問題中起着特別重要的作用，首先应当指出的是喀山大学教授俄國水力学界的奠基者И.С.葛罗米柯〔И.С.Громека（1851—1889）〕，他研究了液体螺旋运动的結構（葛罗米柯液体螺旋运动方程式）及Н.П.彼得洛夫教授〔Н.П.Петров（1836—1920）〕他在1882年發表了世界聞名的研究工作“潤滑液体摩擦的水动力学理論”。偉大的俄國学者Д.И.孟德列也夫〔Д.И.Менделеев（1834—1907）〕第一个陈述了关于液体存在着两种狀態的概念。在他的著作“論液体阻力及空气懸浮”中（發表于1880年）写道：“毫無疑問，在細的毛細管实验中阻滯力或摩擦力几乎与流速的一次方成正比，而在粗的管子内則几乎是与速度的二次方成正比。”其后英國学者雷諾茲〔Осборн Рейнольдс（1883）〕用实验方法証实了这二种运动狀態（層流与紊流）的存在。

有名的俄國工程师及学者В.Г.舒霍夫〔В.Г.Шухов〕在1886年第一个完成了关于石油水力学方面的研究，第一个研究了大粘性液体的运动。

天才的俄國学者 Н.Е.茹可夫斯基教授〔Н.Е.Жуковский（1847—1920）〕远在十九世紀末叶就第一个解决了管中的水錘問題（1898），奠定了水力学中最重要問題之一的研究基礎，对俄國及全世界的科学作了重要的貢獻。

上述彼得洛夫教授的經典著作所奠定的思想繼續反映在1906年茹可夫斯基与С.А.恰潑

雷金 (С.А. Чаплыгин) 共同發表其著作“論軸頸与軸承間潤滑層的摩擦”。一文內。在著作中得出了彼得洛夫問題的精确的数学解法。最后，在1906年茹可夫斯基研究了机翼昇力的理論，第一个解决了这个在空气动力学及流体动力学上的重要問題。茹可夫斯基方法可用于飞机机翼的計算上，以及水輪机、离心泵及旋漿泵动輪輪叶的計算上。

最后，应当提出恰潑雷金發表于1902年的傑出著作“論气流”，这本著作奠定了关于气体运动的一門新科学（气体动力学）的基礎。

偉大的十月革命以后，在苏联的第一个五年計劃时期內苏联工程師們就面臨着一系列关于發展苏联水輪机、泵及机床的制造，發展水运、空运、鐵路、公路運輸以及其他等等方面复雜的水力学問題。

为了实现列寧的电气化計劃[（全俄电气化）批准于1921年]，要求建造巨大的水工建築物（伏尔霍夫、第聶伯尔水电站）及制造大型的水輪机组。因而随即發生了很多極复雜的水工建築物及水力机械的設計和施工上的問題。然而現場上所提出的这些問題在当时大部分为水力学所无力解决的。当时曾建立了大批企業式水力及水力机械實驗室，类似工厂中的生產實驗室一样，進行了为設計建築物及設計机械的水力研究工作。

在莫斯科运河的建設中，曾建立过研究旋漿式泵模型試驗的專門實驗室，賴以設計和制造优良的高效率的泵。

苏联的科学研究机构及高等学校的大型水力實驗室完成了或正在進行着具有很大学术价值的工作。特別应当指出的是以茹可夫斯基命名的中央空气流体动力学研究所，那里正在研究关于空气动力学及流体动力学方面的繁重工作。

綜上所述，可見在水力学上科学与生產的結合是非常有益的和有价值的，它使水力学由原先大部分为抽象的科学成为一門先進的、被称为“工程水力学”的科学，而苏联的水力学学者們在水力学各个方面的造詣已毫无疑义地远远超过了其他各國的学者們。

工程水力学的形成，巴甫洛夫斯基院士起着主導作用，他解决了很多水力学上的重要問題，特別是他求得了十分完善的用于計算管中及渠道中均匀流动时阻力的公式，進行了关于計算各种水阻概括性公式論据的研究，拟定了明晰的水阻分类。最后，彌足珍貴的是巴甫洛夫斯基成功地創建了苏联水力学界，其中有名望的为М.Д.切爾陀烏索夫 (М.Д.Чергозов)、А.Н.拉赫曼諾夫 (А.Н.Рахманов)、С.В.伊茲巴什 (С.В.Избаш)、В.И.阿拉文 (В.И.Аравин) 及其他許多学者等。

Л.С.列賓崇院士 (Л.С.Лейбензон) 在繼續發展彼得洛夫教授、茹可夫斯基教授及恰潑雷金院士所創立的滑潤水动力学理論的工作方面是非常有价值的。

而且列賓崇院士还發展了茹可夫斯基所創立的管中水錘的理論，得出关于解决压力水管中液体不穩定流动問題的一系列的方法，同样在石油水力学上亦完成了一系列的工作。

А.Н.柯尔莫郭洛夫院士 (А.Н.Колмогоров)、М.А.維立加諾夫教授 (М.А.Великанов) 及Г.А.郭尔申柯 (Г.А.Горюнов) 等完成了关于液体紊流方面的巨大研究，对于發展近代水力学的貢獻是很有价值的。柯尔莫郭洛夫院士根据概率理論应用統計研究法研究了紊变 (турбулентность) 的一般理論，从而奠定了現有半經驗紊变理論的論据。С.А.赫里斯奇昂諾維契 (С.А.Христианович) 院士关于液体不穩定流动方面的工作是非常有价值的，他創立了不穩定流动方程式的一般積分法。

上述苏联工程水力学發展簡史証明苏联学者为解决实际生活所提出的許多的实际問題進

行了巨大的工作。与生产紧密相结合，顺利地解决了许多的问题，丰富了科学，并使苏联工程水力学无可争辩地雄居世界第一位。

十九次党代表大会的历史性决议摆在苏联工程水力学面前的一项巨大任务，就是继续发展水电建设及机械制造。在这五年内应当将古比雪夫、卡姆、明格恰乌尔以及其他水电厂（总容量4016-仟瓩）投入运行，并大规模地进行斯大林格勒、卡霍夫、新西伯利亚及其他许多水电厂的建设工作。计划在五年内水轮机生产增加7.8倍。

在新的五年计划内，机械制造及金属加工的产品应当增加约二倍；同样石油工业和其他各企业的生产量亦应增加差不多相同的倍数。

苏联水力学工作者所走过的光荣道路使我们深信完全可以光荣地实现十九次党代表大会指示上所规定的巨大任务，苏联水力学工作者们将在建设苏联共产主义社会的事业中作出自己的贡献。

第一部分 水 力 学

第一章 流体的物理性質及最主要的定义

1-1. 流体最重要的物理性質

流体为一种物体，流体中各質點（組成流体的質點）間的联系極為薄弱。这种質點間联系的薄弱，可以用在質點間的凝聚力及摩擦力甚小來說明，因此，流体的質點具有極大的流动性，而流体无独立的形狀，其形狀随所处容器而异。

所有存在于自然界中的流体可分为滴狀流体与气态流体。如水、石油、煤油、气油、酒精、水銀等流体属于滴狀流体。某些已被熔化的固体（如鉛）也具有滴狀流体的性質。

滴狀流体具有下列的特性：对壓縮的抵抗甚强，因此其特點为几乎完全不可壓縮；組成液体的各質點間的凝聚力及摩擦力甚小，因此对張力及切力的抵抗極弱，但具有頗大的粘性。

气态非滴狀的可壓縮流体 所有的气体皆属于此种流体，其特性为具有很大的壓縮性，对張力及切力絲毫沒有抵抗，沒有边界自由表面，并且有較小的粘性。

在水力学中僅研究滴狀流体，而气体則在專門的学科中研究，其中如热力学，空气动力学及气体动力学。由于水力学中的許多原理都可推广到气态流体中去，所以在本教程中将介紹一些气体的基本性質。

滴狀流体的壓縮性、溫度膨脹及密度

滴狀流体具有極小的壓縮性；因此体積壓縮系数（压力增大1个大气压时流体体積相对縮小的数字）極小。例如温度为0°至20°C时淡水的体積壓縮系数的平均值为

$$\beta = 0.0000475 = \frac{1}{21000}$$

当溫度及压力增高时流体的壓縮性将略微减小。例如，当溫度达到100°C，压力达到500个大气压时，水的体積壓縮系数自 $\frac{1}{21000}$ 减小至 $\frac{1}{25000}$ 。在保持一般的溫度下，当压力

自500个大气压增至1000个大气压时，水的体積壓縮系数自 $\frac{1}{21000}$ 减小至 $\frac{1}{24000}$ 。根据已有的

各种滴狀流体壓縮性的資料，可以計算滴狀流体的正常彈性系数，亦即計算滴狀流体体積壓縮

系数的倒数值： $E = \frac{1}{\beta}$ 。淡水的正常彈性系数一般採用： $E \approx 21000$ 公斤/公分²。石油及水

銀的数值分別如下：

	β	E公斤/公分 ²
石油.....	0.0000740=1/13500	13500
水銀.....	0.00000313=1/330000	330000

流体的温度膨胀系数（温度增高1°C时所增大的流体体积的数字）系随压力的变化而变化。水的温度膨胀系数系随压力的增大而增大，但大多数其他滴状流体的温度膨胀系数系随压力的增大而减小。表1—1中所列者为水的温度膨胀系数值：

水的温度膨胀系数 β_T 表1—1

压 力 大 气 压	温 度 t °C				
	4—10	10—20	40—50	60—70	90—100
1	0.000014	0.000150	0.000422	0.000556	0.000719
100	0.000043	0.000165	0.000422	0.000548	—
500	0.000149	0.000236	0.000429	0.000523	0.000523

石油在一般情况下的温度膨胀系数值 $\beta_T=0.000600-0.000800$ ，水銀 $\beta_T=0.000180$ 等。滴状流体的温度膨胀系数虽较其体积压缩系数大得多，但其仍然是很小的数字。

所以，对大多数的工程计算来说，可以认为在日常所遇到的压力及温度变化范围内，滴状流体的体积不变，这是足够精确的。

以 ρ 表示流体的密度，亦即流体单位体积的质量，而以 γ 表示单位体积的重量，写出众所周知的等式：

$$\gamma = \rho g \text{ 或 } \rho = \frac{\gamma}{g} \text{ 公斤} \times \text{秒}^2 / \text{公尺}^4 \quad (1-1)$$

式中 g ——重力加速度。

因此得出，当压力及温度变化时，如认为滴状流体的体积不变，则在所有情况下其密度亦可认为不变，此时，其重度亦应认为不变。如在压力及温度变化时，密度发生某种改变，那末在通常情况下，它已超出一般水力计算精确度的范围。在这方面而言，已有的水的密度的资料具有极大的意义。

以 δ 表示水的相对密度。已知温度下的水的密度与水的最大密度（相当于 $t=+4^\circ\text{C}$ 时）的比值称为水的相对密度。表1—2中所列数据，表示在大气压力下水的相对密度与温度的关系。

水的相对密度 表1—2

$t, ^\circ\text{C}$	δ	$t, ^\circ\text{C}$	δ	$t, ^\circ\text{C}$	δ	$t, ^\circ\text{C}$	δ
0	0.99987	10	0.99975	30	0.99576	70	0.97794
3	0.99999	15	0.99915	40	0.99235	80	0.97194
4	1.00000	20	0.99826	50	0.98820	90	0.96556
5	0.99999	25	0.99712	60	0.98338	100	0.95865

其他滴状流体的相对密度的数据大体上与上述数据相仿。因此滴状流体的密度实际上可以认为是不变的。

但在某些情况下必须计及流体的可压缩性及其温度膨胀和流体密度的改变，因为对此种

因素变化的影响已不能忽略不計。例如研究管中水錘現象时，体液的压缩性即为說明水錘現象的重要事实之一。

滴狀流体的比重与重度

为了表示液体重量的特性，我們应用比重与重度的概念。

某流体的重量与温度为 $+4^{\circ}\text{C}$ 时同体积蒸馏水重量的比值称为比重。

流体的單位体积的重量称为重度。因此流体的比重为无因次值，而重度为有因次值克/公分³，公斤/公分³，公斤/公尺³，吨/公尺³。此二值的大小可能是相等的。

表1—3所列者为在工程实际中所最常涉及的某些滴狀流体的比重。

某些液体的比重

表1—3

流 体 名 称	比 重	t°C	流 体 名 称	比 重	t°C
清潔的淡水	1.00	4	石油	0.88—0.89	15
一般海水	1.02—1.03	4	潤滑油	0.89—0.92	15
輕石油	0.86—0.88	15	重油	0.89—0.94	15
中石油	0.88—0.90	15	煤焦油（瀝青）	0.93—0.95	15
重石油	0.92—0.93	15	无水酒精	0.79—0.80	15
煤油	0.79—0.82	15	甘油	1.26	0
飛機汽油	0.65	15	水銀	13.6	0
普通汽油	0.70—0.75	15			

凝聚及表面張力的作用

由于液体各質點（分子）間分子的相互吸引，因而在液体內產生凝聚力。但是液体內部各質點間所產生的凝聚力是相互平衡的。实际上僅僅在液体的边界上（液体与固体的接触面，液体的自由表面）才呈現凝聚，因而引起容器壁的湿润、液体的毛細管昇高及表面張力。凝聚力的作用通常在物理学中論述（例如毛細管理論），此处僅闡述一下表面張力的作用。由于液体表面上各質點間的（分子）相互吸引，作用在这些質點上的作用力相互平衡后，即產生表面張力。因而在液体表面形成了特有的一層，需加某种外力才能使其破裂。表面張力的大小決定于液体的类别及温度。具有自由表面、温度为 20°C 时的水，其表面每一單位長度上的表面張力值約为0.0074公斤/公尺，在同样情况下，水銀約为0.055公斤/公尺。由于表面張力的数值甚小，所以通常不予計算。

因此，由于在滴狀流体内实际上沒有凝聚力，因而滴狀流体不能抵抗張力。例如水的抗張力僅为0.00036公斤/公分²。

內摩擦力（粘性力）

設想流体流动时系某一流体層沿另一流体層滑动，而其过程类似于摩擦过程。所以将此種流体層間滑动时所產生的力称为內摩擦力，而这种具有內摩擦的流体称为粘性流体。

因为任何的摩擦均会产生能量損失，所以粘性流体运动时亦不可避免地要損失液流中所

含能量的一部分。远在1687年，牛頓就發表了关于相鄰运动流体層間所產生的內摩擦力与相对运动的流速及接触面（沿此接触面發生相对运动）面積成正比，与流体的类别有关，而与压力无关的假說。

牛頓的假說經過了无数实验的验证，完全得到了证实。傑出的俄國学者、潤滑水力学理論的創始人H. П. 彼得洛夫教授（1836—1920）完成了关于証明这个假說的極有价值的研究工作。

可以用下列的数学式來表示关于內摩擦力与流体接触層間相对运动的流速成正比的假設：

$$T = S\mu \frac{du}{dh} \quad (1-2)$$

式中T——內摩擦力；

$\frac{du}{dh}$ ——流速梯度；

du ——流体相鄰接触層間流速的差值（假定这些流体層为无限薄）；

dh ——相鄰層軸間的距离（圖1—1）；

S——接触層面積；

μ ——表征流体粘性的粘性系数。

由于粘性流体中的內摩擦而發生切应力，此切应力可以用內摩擦力T除以摩擦面S而求得：

$$\tau = \frac{T}{S} = \mu \frac{du}{dh} \quad (1-3)$$

当流体停止流动时，滑动速度为零，內摩擦力亦将不存在了。所以在靜止的流体中不呈現內摩擦力，因而不呈現切应力。粘性系数

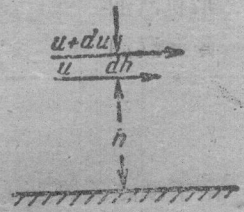


圖1—1

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dh}} \quad (1-3')$$

表征滴狀流体的粘性，称为粘性动力系数。粘性动力系数具有 $\frac{\text{公斤} \times \text{秒}}{\text{公分}^2}$ 的單位。对固体來說， $du=0$ ，其粘性系数 $\mu=\infty$ 。在絕對單位制（C.G.S.）中，粘性动力系数具有的因次为 ML/T^{-1} ，故取粘性的單位为 $\frac{1 \text{ 达因} \times \text{秒}}{\text{公分}^2}$ ，并称此为泊。1泊等于 $0.01019 \frac{\text{公斤} \times \text{秒}}{\text{公尺}^2}$ ，以此可以將絕對單位制換算成工程單位制。表1—4中所列数字为某些工程实际中所最常遇到的液体的粘性动力系数值。

流体的粘性系随温度的变化而变化。同时滴狀流体的粘性系随温度的增高而迅速地减小。例如，水的粘性动力系数当温度 $t=0^\circ\text{C}$ 时为 $\mu=0.0179$ ，但当 $t=100^\circ\text{C}$ 时减小至 $\mu=0.0028$ ；

某些液体的粘性动力系数值 (泊)

表1-4

液 体 名 称	t°C	μ
一般汽油	18	0.0065
水	20	0.0101
无水酒精	18	0.0133
水銀	20	0.0157
煤油	18	0.0250
輕石油	18	0.2500
重石油	18	1.4000
潤滑油	20	1.7200
甘油	20	8.700

潤滑油的粘性动力系数当 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时 $\mu=6.40$ ，而 $t=60^{\circ}\text{C}$ 时减小至 $\mu=0.22$ 。表1-5中的数据为上述的液体粘性动力系数 $\mu=f(t)$ 的变化。

温度变化时水及潤滑油粘性动力系数的变化 (泊)

表1-5

t, °C	0	10	20	30	40	60	100
水	0.0179	0.0131	0.0101	0.0080	0.0066	0.0048	0.0028
潤滑油	6.40	—	1.72	—	0.54	0.22	—

当压力变化时滴状流体之粘性变化甚小，因而在大多数情况下此种变化可以忽略不计。实际上經常所应用的并非粘性动力系数 μ ，而是粘性动力系数和液体密度的比值：

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 公尺²/秒，該比值称为粘性运动系数。 ν 值之所以被称为粘性运动系数因該系数的

因次內僅具有运动要素：長度及時間。

液体粘性的測定 用專門的仪器來測定液体的粘性，这种仪器称为粘性仪。

粘性仪有几种型式。在苏联基本上是採用恩格勒型的粘性仪 (OCT 6275)。此种型式的粘性仪 (圖1-2) 系用以測定粘性較水为高的滴状流体的粘性的。恩格勒型粘性仪是由一具有球状底的金屬 (黃銅) 圓筒 1，及焊接在其底部的一黃銅圓管 3 所構成。此圓筒放在水筒 2 中。在黃銅圓管孔內插入一圓錐形白金短管 4，以使被試驗的液体自圓筒 1 中流出。短管 4 的孔口直徑約 3 公厘，用一特殊的門柱關閉。在試驗开始之前將需要測定粘性的液体 200 公分³ 注入圓筒 1 中。此时白金短管 4 的孔口应以門柱堵閉。

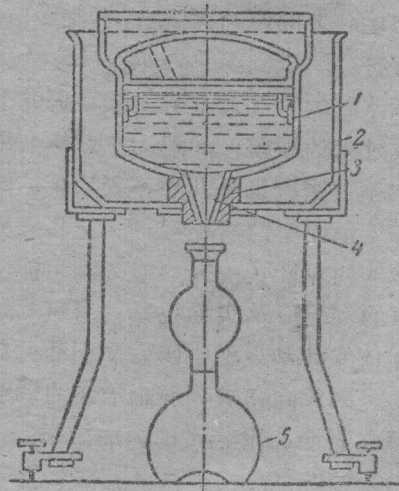


圖1-2

圓筒 1 中应保持一定的溫度（藉助于煤氣燈 5 ①與水筒 2），溫度系用兩支溫度計測量，其中一支放入水筒中，另一支放入圓筒中，此後，使其達到所需之溫度，開啓短管 4 的孔口并測定放空圓筒 1 的時間，亦即測定流出被試驗液體 200 公分³所需的時間 t_1 。然後測定放空圓筒 1 中的溫度為 20°C 時 200 公分³蒸餾水所需的時間 t_2 。（此時間約為 50 秒）。時間 t_1 及 t_2 的比值稱為恩格勒度數并以 °E 表示：

$$^{\circ}\text{E} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-4)$$

因此，200 公分³被試驗液體的流出時間與溫度 20°C 時同體積蒸餾水的流出時間的比值稱為恩格勒度數。將以恩格勒度數表示的液體粘性換算為粘性運動系數，可以利用文獻中已有的經驗公式

$$\nu = \left(0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}} \right) \text{公分}^2/\text{秒} \quad (1-5)$$

最後，如已知液體的密度即可求出粘性動力系數，此系數根據粘性運動系數的定義等於：

$$\mu = \nu \rho.$$

1—2. 理想液體的概念

在研究滴狀流體的基本物理性質時已確定了存在於自然界中的液體（或者如通常所稱的“實際”液體）實際上具有不變的密度，以及在各質點間具有極小的凝聚力。實際滴狀流體的這些物理性質，使得在水力學中可以引入“理想”或“完善”液體的概念，引用這些概念的目的是簡化許多流體力學及實用工程水力學問題的求解。

因此，凡認為是完全不可壓縮的、完全不可膨脹的、質點具有絕對的流動性的和液體內沒有內摩擦力（即沒有凝聚力，粘性等於零）的液體，則此種理論上的液體稱為“理想”液體或“完善”液體。

十分顯然，忽略液體的可壓縮性與可膨脹性，以及忽略凝聚力和內摩擦力，將會大大地簡化許多問題的求解。在許多情況下如欲計及所有這些因素，一般都將得不到任何的最終解答。所以利用“理想”液體的概念是極為有效與極為實用的。下述事實說明利用“理想”液體概念的重大作用，即在研究中以“理想”液體代替“實際”液體來進行研究時，并未造成過大的誤差：如認為“理想”液體是絕對不可壓縮與膨脹的，而所觀測的“實際”液體的體積與密度也是幾乎不變的；如認為“理想”液體中的質點是具有絕對的流動性的，而“實際”液體中的質點也是具有高度流動性的，因而其凝聚力通常可忽略不計。因此，僅當忽略液體的粘性（內摩擦力）時可能使所得結果與實際情況有着某些出入。但是此點藉助于實驗室的實驗以及實際觀察，有可能計及和消除這些由於用“理想”液體的流動來代替“實際”液體的流動以進行研究而引起的誤差。

因此，在解決靜止液體的問題時，亦即在解決水靜力學的問題時，利用“理想”液體的概念將會得出非常精確的結果。

①原書圖中標號 5 應為接液體的量筒，恐有誤。——譯者

1-3. 气体物理性質的簡述

由于气体的密度与重度在極大的程度上决定于压力及温度的变化，因此它与滴狀流体的区别在于气体是具有極大的可压缩性。

气体的压缩过程与膨胀过程遵循着热力学中著名的波义耳——馬利奥特及給呂薩克定律（此定律系对理想（完善）气体而言）。

波义耳——馬利奥特定律可用下列关系式表示：

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}, \quad (1-6)$$

式中 p_1 及 p_2 —— 压力；

V_1 及 V_2 —— 温度不变时的气体的体积。

当压力不变时，給呂薩克定律可用下列方程式來表示体积与温度的关系。

$$V_1 T_1 = V_2 T_2 = \text{const}, \quad (1-7)$$

式中 T_1 及 T_2 —— 绝对温度，分别为

$$T_1 = \left(1 + \frac{t_1}{273.15} \right) \text{ 及 } T_2 = \left(1 + \frac{t_2}{273.15} \right),$$

或 $T_1 = (1 + \alpha t_1)$ 及 $T_2 = (1 + \alpha t_2)$

式中 $\alpha = \frac{1}{273.15} = 0.003661$ —— 膨胀系数，对所有的气体均相同；

t_1 及 t_2 —— 气体的摄氏温度。

但实际气体与上述定律是有某些出入的。误差随压力的增高与温度的减小而增大。波义耳——馬利奥特定律僅对温度为 0°C 、压力为 1 至 850 个大气压时的氮气才是足够精确的。而在这种情况下大多数的气体（其中除去氢、氮及氦）在压力变化时具有 pV 的最小值，这是由于在低压力时所呈现为压缩较强，而在高压力时所呈现为压缩较小之故。

根据給呂薩克定律及波义耳——馬利奥特定律得出理想气体状态方程式：

$$pV = GRT \quad (1-8)$$

式中 附加的符号：

G —— 重量，公斤；

$R = \frac{848}{M}$ 公斤·公尺/公斤·度 —— 气体常数，等于加热 1°C 时 ($p = \text{const}$) 膨胀 1 公斤气体

所作之功；

M —— 气体的分子量。

气体的状态变化可按下列三种过程之一來发生：恒温过程，絕热过程，多变过程。

在温度不变时，发生气体状态变化的恒温过程用波义耳——馬利奥特定律的方程式 (1-6) 來表示。

在周围介质的温度不起影响时发生絕热过程。可用下式表示之：

$$pV^k = \text{const}, \quad (1-9)$$

式中 絕热指数 $k = \frac{C_p}{C_v}$ 此处 C_p —— 定压比热， C_v —— 定容比热。

不同于恒温过程与絕热过程的气体状态的变化过程称为多变过程，以多变过程方程式表示之：

$$pV^n = \text{const}, \quad (1-10)$$

式中 n ——在每一具体情况下的多变指数，系根据曲线 $V=f(p)$ 的分析而得。十分显然，当 $n=1$ 时将为恒温过程，而当 $n=k$ 时则为絕热过程。因此，恒温与絕热过程可作为多变过程的特殊情况来看待。

表1—6中所列者为应用气体状态方程式时所必需的某些气体的基本特性值。

表1—6

气体名称	分子式	分子量 M	气体常数R 公斤×公尺 公斤×度	重度 γ_0 公斤/公尺 ³	零度时的 $k = \frac{C_p}{C_v}$
氮	N ₂	28.016	30.25	1.2505	1.40
氨	NH ₃	17.031	49.80	0.7714	1.32
乙炔	C ₂ H ₂	26.04	32.50	1.1709	1.23
氢	H ₂	2.0156	420.50	0.0899	1.41
空气	—	28.96	29.27	1.2928	1.40
氦	He	4.002	211.90	0.1785	1.66
氧	O ₂	32.000	26.50	1.4290	1.40
甲烷	CH ₄	15.04	52.80	0.7168	1.30
一氧化碳	CO	28.01	30.25	1.2500	1.40
二氧化碳	CO ₂	44.01	19.25	1.9768	1.31
氯	Cl ₂	70.914	11.95	3.2200	1.34
二碳烯	C ₂ H ₄	28.05	30.23	1.2605	1.24

列举出强烈加热水蒸气的絕热指数值亦是很有意义的。其指数数据如下：

°C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
k	1.300	1.306	1.302	1.297	1.290	1.283	1.276	1.268	1.259	1.250

最后指出，在相应的地方将阐述怎样才能将某些水力学的关系式应用到气态流体上去。

1—4. 水力实验在解决工程水力学各种问题中的作用

水力学是一门科学，其中实验室的实验以及对自然界中各种水力现象的观察起着非常大的作用。假如没有广泛地进行实验室的实验，水力学将不可能达到现有的发展。这说明当解决一系列重要的工程问题时所观察和研究的许多水力现象的极端复杂性，和将那些得自不同程度的简化假定的成果加以相应的修正的必要性。因此，水力实验的作用是非常重大的。下面将列举近代实验研究的一些基本方向。

如前所述，在水力学中广泛地应用“理想”液体的概念。很自然，所得的理论解答是存在于自然界中的实际液体所遵循的关系式是有差别的。检查理论计算结果的唯一可能性是在水力实验室内进行实际液体的实验，或者组织实际液流的观测。实验数据和理论数据符合

的程度是評定理論解答精確性的重要準則。此外，在比較了上述數據的結果後，總可以在所得的理論公式內引用修正係數以進行必要的修正。例如，用“理想”液體推導出來的公式所計算出的數值為 Δ_T ，而實驗室實驗所得結果為另一值 Δ_0 （是以應用該公式為條件的），該值不同於 Δ_T 值。又令該兩值之比為 α ，則 α 將表示實驗數據和理論數據符合的程度：

$$\frac{\Delta_0}{\Delta_T} = \alpha \quad (1-11)$$

數值 Δ_0 是相對於“實際”液體的，因而該值應作為基本數值。所以我們所需要的關係式如下：

$$\Delta_0 = \alpha \Delta_T, \quad (1-12)$$

式中的修正係數 α 是用實驗方法求得的。因此，知道修正係數 α 後，並將其引入到理論公式中去，則將得出相當於實際液體的十分準確的結果。

由於水動力學的一些個別問題在近代還不可能用理論的方法來解決，因而不得不尋求簡單的經驗係數（在實際工程的某些場合下所需要應用的係數）。所有這些經驗關係式和公式僅能得自實驗研究所得的結果。

在蘇聯開始發展巨大的水力建設的近二十年來，實驗室的水力研究起了特別重要的作用。由於進行了水力發電站各個組成部分（尾水管，進口欄護柵等）以及整個水力樞紐模型的試驗研究，因而有可能來解決許多近代不能用理論計算所解決的問題。

第二章 水 靜 力 學

2—1. 水靜壓力及其特性

液體處於靜止狀態時，在液體內不呈現粘性力。因此，靜止液體的特性很近似於“理想液體”的特性。所以應用“理想液體”的概念來解決水靜力學的一切問題是很精確的。

靜止液體受到兩類外力的作用：質量力和表面力。

質量力是和液體質量成正比的力：如重力及慣性力。例如，當液體在等速旋轉容器內處於相對靜止時，便有慣性力的作用。

表面力是作用在被研究液體體積表面上的力，例如作用在液體由表面上的大氣壓力。

由於外力作用的結果在液體內部產生了壓力，這種壓力稱為水壓力（或者稱為水靜壓應力）。

茲敘述關於水靜壓力概念的一些基本情況。試觀處於平衡中的某一液體體積（例如圖2—1所示）。用平面AB將該液體體積分割為兩部分。包含在這個體積部分Ⅰ內的液體沿分割面AB作用在部分Ⅱ上。在AB平面上任取一點C，並在其附近取 ω 面積。則在該面積上將承受某作用力P，這力稱為面積 ω 上的總水靜壓力。如果我們將總水靜壓力除以面積 ω ，則得平均作用在單位面積上的力：

$$P_{cp} = \frac{P}{\omega} \quad (2-1)$$

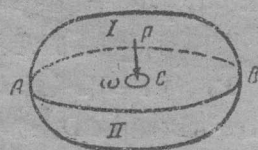


圖2—1