



中等專業學校教學用書

水 力 學

Е. В. 拉賓諾維奇著

高 等 教 育 出 版 社



中等專業學校教學用書



水 力 学

E. 3. 拉賓諾維奇著
天津大學水利系水力学教研室譯

高 等 教 育 出 版 社



本書係根據蘇聯國立技術理論書籍出版社 (Государственное издательство технико—теоретической литературы) 出版的拉賓諾維奇 (Е. З. Рабинович) 所著“水力學”(Гидравлика для техникумов) 1952 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為中等技術學校教學參考書。

本書講述普通水力學課程，內容包括緒論，水靜力學，水動力學，水力阻力，孔口及管嘴洩流，管路，明渠水流，溢水堰，地下水等各章。書末並附有例題。

本書係天津大學水利系水力學教研室翻譯。

水 力 學

Е. З. 拉賓諾維奇著

天津大學水利系水力學教研室譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 34(觀 31) 開本 850×1168 1/32 印張 9 15/16 字數 253,000

一九五四年七月上海第一版

一九五六年十月上海第五次印刷

印數 11,001—13,000

定價 (10) 洋 1.27

序

本書是中等技術學校水力學課程用的教學參考書。同時，本書也可用爲“在生產中工作的”工程技術人員的實用手冊。

書內講述普通水力學課程，並研究某些對若干專業有着重要意義的問題（滲流，明渠變速流等）。同時，本書集中巨大注意力用以揭發水力學各現象的實質，並應用水力學各定律來解決各種技術範圍內的實際問題。考慮到後一情況，書末援引了一些解算典型習題的實例。

著者曾認爲還有必要來研究若干純流體力學的概念和問題，並且有必要來引援一些由理論流體力學而獲得的最重要而基本的結果，因爲沒有這些結果，在今天甚至在初級課程內，很多的重要水力學現象的研究乃是不可能的。

所以，雖然本教程內的材料的闡述乃是初級的，但是在一些各別的情況下，祇要爲了問題敘述的完備而有需要時，則著者便認爲有可能來使用高等數學的方法，這種地方都是用小號字（六號字）標出的，並且可以如願地加以刪去而無損於其他材料的研究。

著者將對閱讀本書時發現可能有的缺點而提出意見的讀者，預先表示謝忱。如蒙賜教，請惠下址：莫斯科，Орликов пер., 3 號，國立技術理論書籍出版社。

1950 年 9 月，莫斯科

目 錄

序

第一章 緒論	1
§ 1. 水力學的定義及其發展簡史	1
§ 2. 基本概念和定義	4
§ 3. 度量的基本制度和單位	6
§ 4. 液體的物理性質	7
第二章 水靜力學	16
§ 5. 靜水壓力	16
§ 6. 水力機械	19
§ 7. 重液體內靜水壓力	22
§ 8. 等壓面	24
§ 9. 連通器	25
§ 10. 測壓儀器	27
§ 11. 平壁上的壓力	30
§ 12. 壓力中心	33
§ 13. 圓柱面上的壓力	36
§ 14. 靜水壓力圖	39
§ 15. 承受內壓力的薄壁圓柱容器的計算	41
§ 16. 靜止液體內物體的平衡	43
第三章 水動力學基本概念和基本方程式	48
§ 17. 水動力學的任務	48
§ 18. 基本概念和定義	48
§ 19. 液體流動圖式	50
§ 20. 水流的水力要素	54
§ 21. 流量和平均流速	55
§ 22. 運動的連續方程式	58
§ 23. 用於理想液體流動的伯諾里方程式	59
§ 24. 伯諾里方程式的物理意義和圖解涵義	63
§ 25. 用於理想液體的伯諾里方程式	66

§ 26. 實際液體的伯諾里方程式	68
§ 27. 實際液體的伯諾里方程式的圖解	70
§ 28. 伯諾里方程式的實驗說明	72
§ 29. 液體流量和流速的測量	74

第四章 水力阻力.....81

§ 30. 液體的黏滯性和內部摩擦定律	81
§ 31. 液體運動的兩種狀態	86
§ 32. 雷諾數	88
§ 33. 水流相似的概念	90
§ 34. 等速流的水頭損失	95
§ 35. 圓管內的層流狀態	97
§ 36. 層流狀態下的水頭損失	100
§ 37. 測量液體黏滯性的儀器	101
§ 38. 紊流狀態下的脈動流速和時間平均流速	104
§ 39. 紊流狀態的結構	107
§ 40. 紊流狀態下的流速分佈	109
§ 41. 牆壁粗糙度的影響	111
§ 42. 水頭損失的基本公式	113
§ 43. 求係數 λ 和係數 C 的公式	115
§ 44. 非圓管內的水頭損失	123
§ 45. 局部阻力	127
§ 46. 局部阻力係數	129
§ 47. 水頭損失的疊加	139
§ 48. 用試驗方法確定阻力係數	140
§ 49. 繞物體流動時的阻力	142

第五章 液體的孔口洩流和管嘴洩流..... 146

§ 50. 薄壁底部孔口洩流	146
§ 51. 流速係數、收縮係數、流量係數	148
§ 52. 側壁孔口洩流	153
§ 53. 水頭變化時的洩流	156
§ 54. 淹沒孔口出流	159
§ 55. 管嘴洩流	161
§ 56. 用試驗方法確定洩流各係數	169

§ 57. 射流壓力	172
第六章 壓力管路內液體運動	177
§ 58. 輸水管用途和分類	177
§ 59. 計算水管的基本公式	178
§ 60. 計算和設計輸水管時的基本問題	185
§ 61. 關於簡單管路的問題	186
§ 62. 複雜管路	189
§ 63. 管路的水力特性	193
§ 64. 虹吸管	196
§ 65. 氣蝕	200
§ 66. 管內水擊	201
§ 67. 不均一液體的管內流動	205
§ 68. 特種管子	209
第七章 液體無壓運動	211
§ 69. 明渠等速流	211
§ 70. 明渠的水力計算	214
§ 71. 渠道的水力最佳斷面	215
§ 72. 容許流速	218
§ 73. 自流管中的運動	219
§ 74. 無壓層流運動	222
§ 75. 明渠中的變速運動	223
§ 76. 變速流微分方程式	224
§ 77. 臨界坡度和水流形式	226
§ 78. 變速流方程式的積分	227
§ 79. 天然河床內自由水面曲線的繪製	233
第八章 溢水堰	235
§ 80. 溢水堰基本概念和分類	235
§ 81. 薄壁堰	237
§ 82. 寬頂堰和實用剖面堰	239
第九章 孔隙介質中液體運動	244
§ 83. 基本概念和定義	244
§ 84. 滲流的基本定律	247

§ 85. 滲透係數的確定	250
§ 86. 無壓地下水流動	252
§ 87. 地下水壓力流	253
§ 88. 流體動力學電擬法	255
例題	257
附錄	294
俄文索引	297
中文索引	304

第一章 緒論

§1. 水力學的定義及其發展簡史

水力學是一種實用科學，從事於研究流動體的靜止定律和運動定律並研討運用這些定律來解決具體技術問題的方法。水力學的實用意義非常巨大，因為他是很多技術範圍內工程計算的基礎並且是下列若干專業科目的根基，如水利技術，水力機械（水泵和水輪機），給水和排水，排水和灌溉，水運，油業等。

水力學是世界上最古老的科學之一。早在公元很久以前的上古時期，由於人類歷史發展的初步開始，人類在事實上曾不得不從事於解決各種不同的水力問題。考古學研究和觀測的結果曾說明了上述情形，該結果指明，早在紀元前五千年時，在中國以及後來在其他某些古代國家內，就已經有過灌溉渠道了，並且某些最簡單的揚水設備也已是人所共知的。在很多的方面，還保存有輸水建築物和水工建築物（水道，大壩，水溝）的遺跡，證明了古代世界建築藝術的極高水平。但是，有關這些建築物的水力計算上的任何知識並沒有過，因而應當假定，它們完全是根據實際的經驗和規則而建築起來的。

關於用科學方法來解決水力學問題的最初陳述應該屬於公元前250年，當阿基米德（Архимед）發現了液體內潛體的平衡定律的時候，但是在其後五百多年來，水力學就未曾獲得過任何顯著的發展。在當時科學和文化都普遍停滯不前的時代裏，不僅知識的最初部份遭到喪失，而且工程藝術的實際經驗在極大程度上也被遺忘了。祇有在第十

六到第十七世紀的建設時代，當研究了很多極重要水力現象的斯鐵文(Стевин)，遼昂納多·達·芬奇(Леонардо Да Винчи)，伽利略(Галилей)，巴斯加(Паскаль)，牛頓(Ньютон)等人的著作出現了的時候，才奠定作為科學的水力學繼續發展的真正基礎。

除了水力學之外，從事於研究液體靜止和運動的還有另一種科學，即發展成為理論力學上一獨立部份的理論流體力學。理論流體力學的特徵是解答方面的精確性和普遍性。它帶有嚴格的數學性質並且在研究水力學現象時，常從描述這些現象的微分方程式來出發。

在十七到十八世紀，由於若干大數學家 and 力學家[歐拉(Эйлер)，伯諾里(Бернулли)，拉格朗什(Лагранж)]的研究工作，曾確立了流體力學的基本定律並獲得了流體力學的基本方程式。這些研究基本上帶有理論性質，包括着許多關於液體物理性質的假定，曾給出較多在質一方面而非在量一方面的現象評價，有時顯然和那些不久以前在流體力學上不起巨大作用的試驗所得的資料發生分歧。所以很自然，流體力學未能滿足於實踐上的很多問題，(尤其是在十九世紀之際由於暴風雨般的成長着的那些需要具體解決的各種工程問題的技術要求是極其增多了那些實踐上的問題)。這種情形就是十八到十九世紀由於謝才(Шези)，達西(Дарси)，布西涅斯克(Буссинеск)，外斯巴赫(Вейсбах)，Н. Е. 儒柯夫斯基(Жуковский)，以及其他各學者和工程師的研究工作而創造的專門實用科學的發展原因，這種科學，現在通常按字面的原義，就叫做水力學。

和流體力學不同，水力學的結論是建築在簡化了的水力現象基礎之上的。它把整理試驗資料結果而得到的一些經驗係數列入於理論方程式中，因為這些試驗在水力學上有着十分巨大的意義。例如，在研究液體流動的時候，水力學通常滿足於平均流速和水流的平均壓力的確定，可是流體力學在大多數情形下卻研究水流內這些量在由一點過渡到另一點時的變化。

在很長的時期內，水力學和液體力學的發展曾走過各自獨立的道路。如果說當初水力學和流體力學所採用的研究方法彼此極為不同的話，則隨着時間過程的變化，這種差異已經逐漸地消失了。因為水力學是一種極為經驗式的科學，也即是一種經驗的公式和係數的科學，而古典流體力學則主要是有着理論的性質，由於大大的消滅了過去水力學和古典流體力學所固有的重大缺點從上世紀末葉兩種科學就大大地接近了。現代的水力學是理論和經驗知識統一的綜合，是一種科學，其中理論結合着經驗，而今天在流體力學上獲得極廣泛應用的經驗則又修正並補充了理論。水力學廣泛地利用着流體力學的方法和結果，因而久而久之，“流體力學”和“水力學”二概念上的差別顯然地將逐漸消失，也許僅能保存純歷史上的興趣了。

祖國（譯註：指蘇聯）的學者們在水力學和流體力學的發展上曾起過巨大的作用。流體力學的創始者丹尼爾·伯諾里（Даниил Бернулли）和遼昂納得·歐拉（Леонард Эйлер）都曾是彼得堡科學研究院的院士，在俄羅斯居住並在俄羅斯工作，其他頗為著名的工作是：潤滑油流體動力學理論創始者 Н. П. 彼得羅夫（Петров），和給出許多流體力學各方面的卓越研究，尤其是製定管內水擊理論的 Н. Е. 儒柯夫斯基二人的工作。Н. Е. 儒柯夫斯基，С. А. 查普雷金（Чаплыгин）和 Н. Е. 柯琴（Кочин）都是今天獲得極大發展的一種新科學——現代空氣力學和氣體力學的創始者；А. Н. 克里路夫（Крылов）的工作創造了現代的船舶理論。Н. Н. 巴甫洛夫斯基（Павловский）在液體變速運動和滲透理論方面的研究，奠定地下水流體力學基礎的 Л. С. 列賓宗（Лейбензон），製定液體不穩定流動理論的 С. А. 赫里斯基阿諾維奇（Христианович）等人的研究和 М. А. 維列卡諾夫（Вешняков）在河流動力學以及其他方面的研究都有着很重要的實用意義。

在斯大林各五年計劃的年代，在建立了像以斯大林命名的白海-波羅的海運河，莫斯科運河那樣雄偉的水工結構物，建築了規模最大的

水電站，建築了並經營了最複雜的灌溉系統、強大的輸水管和輸油管的時分，水力學的試驗研究在蘇聯獲得尤其巨大的意義。這些年代在我們的國家（譯註：指蘇聯），建立了專業科學研究院和實驗室的網系，各該研究院和實驗室，進行了研究各種不同水力現象方面的有計劃的巨大工作。由於蘇聯部長會議關於偉大的共產主義建設，建設古別雪夫和斯大林格勒水力發電站，土庫曼大運河，卡霍夫水力發電站，南烏克蘭和北克里木運河的具有歷史意義的決定，使試驗研究工作在今天獲得了更加巨大的規模。

§2. 基本概念和定義

流動體或流體，廣義說來，是一種在最小量的力的作用下而很容易改變其形狀的自然體。和固體不同，流體具有質點極大流動性的特徵，因而它們能夠隨遇而安地接受盛裝它們的容器的形狀。

流體一般分為兩種：成滴流體和氣態流體。成滴流體就是液體。屬於這一類的是在自然界內常遇到的並在實用上常用的各種不同的液體如水，石油，煤油等。所有成滴流體對於體積的變化都有着巨大的阻抗，並且很難承受壓縮。在壓力和溫度的變化下，它們的體積變化得極小。相反的，氣態流體（氣體）則隨該二因素的變化而大大改變着自己的體積，在水力學內，通常只研究成滴流體，今後為了簡便起見將簡稱之為液體。氣態流體，其性質和應用則在相應的專業科目——熱力學和空氣力學內加以研究。

成滴流體對於拉力事實上並沒有顯著的阻抗。在液體分子間存在的凝結力祇在表面上，以所謂表面張力的形式而呈現出來，在那裏對於破裂呈現着某種阻抗性。這說明着，例如肥皂泡薄膜的存在，保持不在重力作用下而降落的滴點的形成等。液體對於破裂的阻力極小；例如數值為 0.00036 公斤/公分² 的力便足以使水破裂，這樣的力大約是破裂鋼鐵所需的力的一千萬分之一。所以對於水力學普通的問題，一般

認為液體內不存在有拉應力^①。

除此之外，應該特別着重指出，液體對剪應力有着極重要的抗拒，這種抗拒表現為液體運動時的內摩擦力；在液體運動時對於這些內摩擦力的正確估計乃是水力學基本任務之一。

在水力學內，液體被當作受限制體積內物質點（質點）的總合；一般分為限制液體體積的固體表面（例如，盛裝液體的容器的底和壁）和所謂自由表面——即一種液體和其他各液體或氣體的交界面（例如，開口容器內液體和空氣的接觸面）。

作用於受限制的液體體積上的各力，和理論力學內所講述的各力一樣，通常分為內力和外力。內力是所討論的液體體積內個個質點間相互作用的力；外力則分為作用於限制液體體積的表面上的力（例如，作用於自由液面上的力，容器壁和底的反作用力）和作用於整個液體體積上的體積力（例如重力）。

為了使若干理論結論和試驗研究趨於簡易起見，在水力學內也常引入理想液體或完全液體這一概念，這種液體具有絕對不可壓縮性，完全沒有溫度的膨脹性，並且對於拉力和剪力沒有抗拒。理想液體不待說當然是實際並不存在的一種虛構液體。在自然中所遇到的一切實際液體，多多少少都具有上述一切性質的特徵。但是，以上曾經指出過，實際液體的可壓縮性，溫度膨脹和對拉力的抗拒都是極其微小的，因而通常都不考慮它們。因此可見，使理想液體之所以和實際液體在本質上有所不同的那種特徵，便是實際液體有着一種由液體特性（黏滯性）所確定的抗抵剪力的力。因為這個緣故，理想液體有的時候便叫做非黏滯液體，而實際液體便叫做黏滯液體^②。

① 但是我們將指出，像液體物理上的最新工作所說明的那樣，在某些特殊情況下（例如在氣蝕現象方面，見§65），液體內也可能短時間內發生極大的拉應力。

② 應當注意，除了現在所確定的和水力學上通用的理想液體這一概念之外，在流體力學上還列入並廣泛地使用着可壓縮的理想液體這一概念。但是這種壓縮性只有在液體流動速度十分大而且接近於聲音速度時纔能表現出來，纔成為可感觸的。所以在通常只與很小的速度發生關係的水力學中，如上所述，一般是不考慮壓縮性這一要素（水擊是例外），而運用不可壓縮的理想液體這一概念，並拋棄不可壓縮的字樣而簡稱之為理想液體。

在自然中常遇到並在實用上應用的液體，它們在不同水力現象時的狀態和性質，都和下列液體物理性質如比重，密度，黏滯性等有着直接的依從關係。所以在直接研究水力學以前的首要任務便是確定這些物理性質，判明對它們有影響的各因素和建定出它們的度量的單位。

§3. 度量的基本制度和單位①

如所週知，現在存在有兩種基本度量的單位制：一種是物理單位制，其中採用長度，時間和質量各單位作為基本單位，另一種是工程單位制，這裏長度，時間和力各單位乃是基本單位。度量的基本單位的因次可簡略地表示如下：長度因次 $[L]$ ，時間因次 $[T]$ ，質量因次 $[M]$ ，力的因次 $[P]$ 。

物理單位制的長度單位，一般採用公分，時間單位採用秒，質量單位採用克（攝氏 4° 時一立方公分的水的質量）。由力學的基本方程式：

$$P = m \cdot a,$$

（式中 P 為力， m 為質量， a 為加速度）所得出的力的因次將是：

$$[P] = \frac{[M] \cdot [L]}{[T]^2}.$$

把一公分/秒²的加速度傳給一克（ g ）的質量所需的力便是力的度量單位。此力叫做達因（ $1 \text{ 達因} = \frac{\text{克} \cdot \text{公分}}{\text{秒}^2}$ ）。

工程單位制的基本單位是：長度單位——公尺，時間單位——秒，力的單位——公斤^②（攝氏 4° 時一立方公寸水的重量）。由同一力學方程式而得出的質量因次可由下面表示式來確定：

$$[M] = \frac{[P] \cdot [T]^2}{[L]}.$$

① 主要自然量的各度量單位和因次列於表1（見附錄，第294頁）。

② 在以公斤和克作為質量單位的物理單位制中，一般用 κg 和 g 來表示它們，而在工程單位制中，公斤和克則是力的單位，一般以 κP 和 P 來表示它們。

一般採用，在一公斤力的作用下能夠獲得 1 公尺/秒² 加速度的質量作為質量的單位。此單位叫做工程質量單位，或簡稱為切姆 (m_{em}) (1 切姆 = 公斤($\kappa\Gamma$) · 秒²/公尺)。

在物理單位制和工程單位制各度量單位之間，存在有一系列的比例關係，這些關係可用於把一種制度的數字換算為另一種制度。

如果採用 1 克(г)的質量和 $a = 981$ 公分/秒² 的加速度，也即是等於重力加速度，則在物理單位制中，我們將得到一個等於 981 達因的力；另一方面，該力乃是一立方公分的水重，在工程單位制內等於 0.001 公斤($\kappa\Gamma$)。因此，

$$\begin{aligned} 1 \text{ 公斤}(\kappa\Gamma) &= 981000 \text{ 達因}; 1 \text{ 達因} = \frac{1}{981000} \text{ 公斤}(\kappa\Gamma) = \\ &= \frac{1}{981} \text{ 克}(\text{г})。 \end{aligned}$$

現在我們將建立質量度量單位之間的比例關係。由以上所做出的定義可以看出，質量的工程單位為：

$$1 \text{ 切姆}(m_{em}) = \frac{1 \text{ 公斤}(\kappa\Gamma)}{1 \text{ 公尺/秒}^2} = \frac{1000 \text{ 克}(\text{г})}{100 \text{ 公分/秒}^2} = 10 \frac{\text{克}(\text{г})}{\text{公分/秒}^2}。$$

而物理單位制的質量單位則為：

$$1 \text{ 克}(\text{г}) = \frac{1 \text{ 達因}}{1 \text{ 公分/秒}^2}。$$

因此，考慮着達因和克(Γ)間的關係時，我們求出：

$$1 \text{ 克}(\text{г}) = \frac{1}{981} \cdot \frac{\text{克}(\text{г})}{\text{公分/秒}^2} = \frac{1}{9810} \text{ 切姆}(m_{em}),$$

因而 1 切姆 = 9810 克(г)。

§4. 液體的物理性質

重率 液體單位體積的重量叫做該液體的重率，或叫做液體的容重。通常重率都用希臘字母 γ 來表示^①。

① 水力學和其他技術科學常採用的希臘字母符號列於表 2 (見附錄)。

因此,

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (1.1)$$

式中 G 為液體重量, 而 V 則為液體所佔據的體積。

按照定義, 重率的因次將是:

$$[\gamma] = \frac{[P]}{[L^3]}。$$

物理單位制度量重率的單位是:

$$[\gamma]_{\phi} = \frac{\text{達因}}{\text{公分}^3},$$

而在工程單位制中, 則是:

$$[\gamma]_{\tau} = \frac{\text{公斤}(\kappa l)}{\text{公尺}^3}。$$

考慮到, $1 \text{ 公斤}(\kappa l) = 981000 \text{ 達因}$ 和 $1 \text{ 公尺}^3 = 1000000 \text{ 公分}^3$ 時, 則可以建立起這兩種單位制重率單位間的關係如下:

$$\frac{[\gamma]_{\phi}}{[\gamma]_{\tau}} = \frac{\frac{1 \text{ 達因}}{1 \text{ 公分}^3}}{\frac{981000 \text{ 達因}}{1000000 \text{ 公分}^3}} = 1.02,$$

或是:

$$[\gamma]_{\phi} = 1.02 \cdot [\gamma]_{\tau}。$$

由此得出結論, 物理單位制的重率單位 $[\gamma]_{\phi}$ 為工程單位制的相應重率單位 $[\gamma]_{\tau}$ 的 1.02 倍。所以把不同單位制中所表示的各重率數量相互對照之後, 我們便將得出決定不同制度內同一重率的單位數量間的數量關係如下:

$$[\gamma]_{\phi} = \frac{\gamma_{\tau}}{1.02}。$$

普通成滴流體的重率 (水銀例外) 和攝氏 4° 時等於 $1000 \text{ 公斤}(\kappa l)/\text{公尺}^3$ 的水的重率十分接近, 並且隨壓力和溫度的變化而極其微弱地變化着。各種液體在正常氣壓下的重率值列於表 1。

表 1. 幾種液體的重率

液 體 名 稱	攝 氏 溫 度	$\gamma \frac{\text{公斤}(\kappa l)}{\text{公尺}^3}$
淡水	15	999
海水	15	1020
水銀	15	13558
蓖麻油	15	970
煤油	15	790—820
汽油	15	680—780
苯	0	900
炔	20	790
醇	0	800
酒精	15	790
無水甘油	0	1260
石油	20	760—900

液體的重率照例隨溫度的增加而減低。在攝氏 4° 時具有最大重率值的水則為此普通規則的某一例外。表 2 上表明大氣壓力下水的重率值隨溫度而發生的變化。

表 2. 水的重率的變化和溫度的關係

攝 氏 溫 度	$\gamma \frac{\text{克}(T)}{\text{公分}^3}$	攝 氏 溫 度	$\gamma \frac{\text{克}(T)}{\text{公分}^3}$
0	0.99987	50	0.98807
4	1.00000	60	0.98324
10	0.99973	70	0.97781
20	0.99823	80	0.97183
30	0.99567	90	0.96534
40	0.99224	100	0.95838

氣態流體具有較成滴流體小得多的重率，而依壓力和溫度發生較大的變化[例如在溫度為攝氏 30° 而壓力為 720 公厘水銀柱時，乾燥空氣的重率 $\gamma=1.104$ 公斤(κl)/公尺³，而在攝氏 0° 和 780 公厘水銀柱時， $\gamma=1.327$ 公斤(κl)/公尺³]。