

ГИДРАВЛИКА



# 水力学

[苏] Ю. М. 康士坦丁诺夫著

钟用升 译

江西高校出版社

---

# 水力学

---

[苏] IO·M·康士坦丁诺夫著

---

钟用升 译

---

江西高校出版社

---

## 中 译 本 序

1984年钟用升同志将 Ю. М. Констатинов 的《水力学》翻译本给我提些看法，我看了以后就推荐给高教出版社，希望能够出版。次年，钟用升同志参加了教委《水力学与工程流体力学课程的经验交流会》介绍了该书的内容。事有凑巧，成都科技大学水利系水力学教研室的杨凌真副教授也在会上对该书作了系统的评价和推荐。杨副教授是留苏的，又主讲给排水专业的水力学多年，内行的评价自然可信，只是高教出版社当时承担的教材出版任务极重，译本的出版计划也排得满满的，由于众所周知的原因，俄文教材的译本一时还难以得到重视。

我在当时推荐这个译本是有许多原因的。首先，我认为苏联的水力学与流体力学有其独特的风格，既不宜独占鳌头，排斥其它，也不宜打入冷宫，全盘否定。我国水力学学科的发展，有待于吸取各国的长处，只有在兼容并蓄的基础上才能有所创新，从而在水力学学科上表现出我国的特色，而当时的译本几乎是又一个“一边倒”，我认为要纠正。其次，我认为这本水力学有许多优点，全书共十二章20多万字，很精练。内容以总流分析法（旧称水力学方法）为基础，吸收了流场分析法（旧称流体力学方法）中一些必要的内容，使水力学保留了重视实际的生动性，提高了理论的严密性，对概念的介绍更清楚。尤

为难得的是在薄薄的一本书中以精练的字句介绍了许多内容，例如对非圆形断面管道产生横向环流的原因作了说明，对淹没射流也作了分析等，取材是非常恰当的。其三，我看了译本，觉得翻译的水平很高，汉语和外语差别极大，按外语直译过来往往读来非常别扭，而钟用升的译本却非常顺口，当然王木兰教授的审校也起了作用。

以上是我回想起来当时愿意推荐的原因，现在时隔多年，我仍认为有出版的必要，并且要补充一个意见，这就是我国教材的改革既要参照英、美、西德、法国的教材，但参照苏联的教材更符合我国现状。就象这本水力学，直接作为我国土建类专业的水力学教材也无不可，而目前，我国土建类专业中，少学时正好缺乏合适的教材，用它来填空正得其时。

张长高

1989年12月 8 日

## 前 言

本书阐述了水力学（工程流体力学）的基本理论，描述了液体的物理性质、液体平衡和运动的规律、流体阻力特性，研讨了水力现象的模型试验问题。

书中相当多的篇幅所阐述的是给排水专业人员所感兴趣的章节。这些章节所涉及的是：管道和输水管网、无压下水管道、输淤管道的水力学问题，人工和天然明渠、堰、量水槽、水流衔接、消能工、跌水、陡槽和其它建筑物的水力学问题，固体颗粒在液体中的自由沉降和强迫沉降、地下水动水力学问题等。书中反映了上述领域中近年来的研究成果。

在教材的阐述中力图使大学生们注意到那些尚未研究充分的现象，作者希望这将提高学生独立探讨的兴趣。

本书的编写是按照苏联高等教育部所批准的《给水和排水》专业标准教学大纲进行的。

书中简略地引用了一些表格和参考资料，这对于学生理解问题的实质是必要的，而只是在某些情况下才列举了一些计算例题，因为它们在B. A. 波里舍柯夫、IO. M. 康士坦丁诺夫、B. H. 波波夫和其它作者的教学参考书中已有详细的说明。作者所编写的教科书和《水力学习题集》一起组成了《给水和排水》专业水力学所必需的教学书籍的整体。本书的一系列章节同时也适用于其它建筑专业的大学生以及相应设计部门的工作者。

本书按照CTCЭB1052—78采用国际单位制（СИ）。

作者对评阅人技术科学博士 H. A. 卡尔特威里希维里教授

和敖德萨建筑工程学院的同事们——技术科学博士 B. O. 波图克教授、技术科学副博士 H. Γ. 德米特里也夫斯基副教授、A. H. 索罗金副教授、Γ. Я. 席维兹副教授所提出的意见和愿望表示感谢，他们在本书付诸出版时曾帮助完善原稿。同时感谢技术科学博士 B. B. 斯梅斯诺夫教授和技术科学副博士 M. C. 克拉斯尼特斯基副教授，他们在作者写作过程中提出了有益的意见。

作者诚挚地接受有关专家们和高等学校水力学教研室全体人员为进一步完善本教材提出批评和建议。

# 目 录

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| 前言                                                | (1)  |
| 绪论                                                | (1)  |
| § 0—1 水力学的定义以及它和其它学科的关系                           |      |
| 水力学发展简史                                           | (1)  |
| § 0—2 液体的基本物理性质                                   | (5)  |
| 第一章 水静力学                                          | (10) |
| § 1—1 静水压强及其性质                                    | (10) |
| § 1—2 液体平衡微分方程(欧拉方程)及其积分                          | (12) |
| § 1—3 重力作用下液体的平衡                                  | (14) |
| § 1—4 液体的相对平衡                                     | (20) |
| § 1—5 液体对平面作用的压力                                  | (24) |
| § 1—6 液体对曲面作用的压力                                  | (28) |
| § 1—7 浮体阿基米德定律稳定性                                 | (33) |
| 第二章 水动力学基础                                        | (37) |
| § 2—1 基本原理 液体运动的形式 研究液体运动的两种方法 流线和总流 当地流速和平均流速 流量 | (37) |
| § 2—2 无穷小液体质点的运动 有旋流和无旋流                          | (40) |
| § 2—3 液体的连续性方程                                    | (45) |
| § 2—4 液体运动微分方程(欧拉方程)及其积分                          | (48) |
| § 2—5 液体的平面势流 拉普拉斯方程 流函数                          | (54) |

|            |                                                          |        |
|------------|----------------------------------------------------------|--------|
| § 2—6      | 非粘性液体元流伯诺里方程·····                                        | ( 62 ) |
| § 2—7      | 缓变流·····                                                 | ( 65 ) |
| § 2—8      | 总流伯诺里方程及其能量意义·····                                       | ( 66 ) |
| § 2—9      | 总流伯诺里方程的几何意义 运用伯诺里<br>方程的几种情形·····                       | ( 70 ) |
| <b>第三章</b> | <b>液体运动的水力摩阻和水头损失</b> ·····                              | ( 77 ) |
| § 3—1      | 水力摩阻的物理本质·····                                           | ( 77 ) |
| § 3—2      | 均匀流基本方程和管道中的水头损失·····                                    | ( 78 ) |
| § 3—3      | 液体的流态 雷诺数和临界雷诺数·····                                     | ( 82 ) |
| § 3—4      | 圆管中液体的层流·····                                            | ( 85 ) |
| § 3—5      | 液体的紊流 脉动流速和时均流速 紊流<br>中的切应力·····                         | ( 91 ) |
| § 3—6      | 管道中的紊流结构 水力光滑管和水力粗<br>糙管 水力摩擦系数 (达西系数) 均匀流<br>的流速公式····· | ( 95 ) |
| § 3—7      | 局部阻力和局部水头损失 突然扩大时的<br>水头损失·····                          | (111)  |
| § 3—8      | 确定局部水头损失的维斯巴赫公式 局部<br>阻力系数和它与雷诺数的关系 局部阻力<br>的相互影响·····   | (117)  |
| <b>第四章</b> | <b>物体和液体的相对运动</b> ·····                                  | (123)  |
| § 4—1      | 物体在液体中的运动和液体对物体的绕<br>流·····                              | (123)  |
| § 4—2      | 固体在液体中的沉降·····                                           | (127)  |
| <b>第五章</b> | <b>有压管路中液体的流动</b> ·····                                  | (133)  |
| § 5—1      | 短管与长管 短管的计算·····                                         | (133)  |
| § 5—2      | 长管的计算 运行过程中管路泄流能力的                                       |        |

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| 变化.....                                           | (139) |
| § 5—3 管路计算课题的几种基本类型.....                          | (143) |
| § 5—4 沿程连续分流管路.....                               | (148) |
| § 5—5 枝状管网的计算.....                                | (152) |
| § 5—6 环状管网的计算.....                                | (157) |
| § 5—7 管道非均质液体的流动.....                             | (164) |
| § 5—8 水击 儒柯夫斯基公式 同水击作斗争的措施.....                   | (168) |
| <b>第六章 孔口与管嘴出流</b> .....                          | (180) |
| § 6—1 薄壁小孔口的恒定出流 淹没 (在水位下) 孔口的出流 测流板.....         | (180) |
| § 6—2 大孔口出流.....                                  | (189) |
| § 6—3 管嘴出流.....                                   | (191) |
| § 6—4 孔口和管嘴的变水头出流 贮水池排空时间.....                    | (198) |
| § 6—5 液体的自由射流.....                                | (204) |
| § 6—6 射流对平面和曲面作用的压力.....                          | (208) |
| <b>第七章 明渠均匀流</b> .....                            | (211) |
| § 7—1 明渠液体流动特点 均匀流方程 流速因子 (谢才系数) 和特征流速.....       | (211) |
| § 7—2 渠道的最优水力断面 梯形和抛物线形渠床的基本水力特征值和几何特征值之间的关系..... | (217) |
| § 7—3 渠道计算问题的几种基本类型 允许最小流速和允许最大流速 流速沿断面的分布.....   | (228) |
| § 7—4 下水道和其他封闭式渠床的水力计算.....                       | (236) |
| <b>第八章 明渠恒定非均匀流</b> .....                         | (247) |

|             |                          |       |
|-------------|--------------------------|-------|
| § 8—1       | 基本概念和定义                  | (247) |
| § 8—2       | 明渠恒定非均匀缓变流基本微分方程         | (256) |
| § 8—3       | 棱柱体明渠自由水面型式的研究           | (260) |
| § 8—4       | 明渠和无压管道自由面曲线的绘制          | (270) |
| § 8—5       | 天然河床自由面曲线绘制的特点           | (280) |
| § 8—6       | 水跃                       | (285) |
| <b>第九章</b>  | <b>堰</b>                 | (299) |
| § 9—1       | 堰的分类 堰的泄流能力 侧收缩          | (299) |
| § 9—2       | 薄壁堰和它在流量量测中的应用           | (303) |
| § 9—3       | 实用断面堰                    | (310) |
| § 9—4       | 宽顶堰                      | (314) |
| § 9—5       | 坝孔和其它水工建筑物的计算            | (320) |
| § 9—6       | 侧堰                       | (321) |
| § 9—7       | 量水槽                      | (324) |
| <b>第十章</b>  | <b>水流衔接</b>              | (327) |
| § 10—1      | 收缩断面水深的确定                | (327) |
| § 10—2      | 水流衔接的形式和收缩断面水跃位置的判<br>据  | (332) |
| § 10—3      | 消能工、消力池和消力坎的计算           | (336) |
| § 10—4      | 挑消坝后的水流衔接                | (345) |
| § 10—5      | 跌水                       | (348) |
| § 10—6      | 陡槽                       | (362) |
| § 10—7      | 闸下出流                     | (369) |
| <b>第十一章</b> | <b>地下水流动</b>             | (375) |
| § 11—1      | 水的渗透 渗流基本定律 渗透系数         | (375) |
| § 11—2      | 水向集水廊道和排水井的汇流 排水计算<br>基础 | (382) |

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| § 11—3 过坝和过水工建筑物下的渗流 巴甫洛夫<br>斯基（水电比拟）法·····       | (390) |
| § 11—4 水通过透水堤的流动·····                             | (399) |
| <b>第十二章 水力模型试验基础</b> ·····                        | (403) |
| § 12—1 几何相似 运动相似和动力相似 水力相<br>似准数 水力模型试验的基本原则····· | (403) |
| § 12—2 压力管道、明渠和水工建筑物的模型试验···                      | (414) |
| <b>参考文献</b> ·····                                 | (422) |

## 后 记

# 绪 论

## § 0—1 水力学的定义以及它和其它学科的关系 水力学发展简史

水力学是研究液体的平衡和机械运动规律并运用这些规律以解决工程实际问题的一门学科。

水力学（即液体力学）分为，研究液体平衡规律的水静力学、研究流动的几何特征值和时间关系之间（速度和加速度）的液体运动学和研究由于力的作用而产生运动的水动力学。

本教程按照苏联高等和中等专业教育部所批准的标准大纲要求，将液体运动学和水动力学的内容结合在一起进行叙述。

《水力学》一词起源于希腊文——**hydor**（水）和**aulos**（管），即水沿着水管流动。在目前，水力学所研究的内容已不仅仅是限于水在水管中的流动问题，它还包括了在明渠（渠道、河道）中，在不同的输水、排水（下水道）和水工建筑物中水的流动问题，地下水以及其它液体（如石油、油、各种溶液等）在管道和建筑物中的流动问题。

在研究液体的运动和平衡规律时，水力学依赖于这样一些学科，如高等数学、物理学、理论力学和投影几何，并部分地依赖于材料力学。同时，水力学又作为《水泵和泵站》、《给水》、《排水》、《房屋卫生工程设备》、《水文学与水工建筑物》等课程，以及课程设计和毕业设计的水力计算的基础。

水力学作为一门学科的发展是同人类利用这一自然界要素

(即水)密切相关的。从古代起水就不仅仅是供饮用,而且还用于灌溉土地和推动最简单的机械。河流和渠道用于船和小舟的通航,并作为抵御敌人进犯的天然和人工的障碍。在美索不达米亚的底格里斯河和幼发拉底河、印度的印度河、埃及的尼罗河、中国的黄河,以及我国的外高加索和中亚地区河流的河岸都发现了远古文明的遗迹。在这些地方,于公元前4,000~1,000年就已经修建了耕地灌溉系统,并在河流上修建了坝和磨坊。在罗马于公元前六世纪就建造了输水管道,其残存部分保留至今。在我国也曾修建了各种灌溉系统、输水管道和水力磨坊。比如,在中亚地区于一千多年前修建了维兹涅沃诺兹水利系统,这个系统借助于运河和船闸经由伏尔霍夫河、涅曼河、慕土塔河、兹拉河、特维兹河、伏尔加河把波罗的海同里海联接起来。这些例子足以证明,在那个时候,人类就已经掌握了足够高的技巧和实用水力学的一定知识,以解决相应的技术问题。

在水力学领域中,我们所知道的第一部科学著作是阿基米德的《论浮体》,它写于公元前250年。在随后的封建社会统治的许多世纪内,都没有出现任何值得一提的水力学研究成果,尽管实际上在这一时期水利建设继续得到了发展。

水力学取得新的进展是在文艺复兴时期。十五世纪末,列奥那多·达·芬奇写出了《论水的流动和量测》,但这部著作直到十九世纪才发表出来。1585年荷兰学者史捷文出版了《水静力学原理》一书,以后又出版了伽里略的著作《论水中的物体及其在水中的运动》(1612年),再后则是多内切里对液体的孔口出流进行了研究(1643年),巴什卡对外力在液体中传递的研究(1650年),牛顿关于液体内摩擦定律的研究(1686年)。

研究液体平衡和运动科学的进一步的发展,导致了与水力

学相近且有着亲缘关系的学科——流体力学的创立。与研究利用试验资料来解决液体力学问题的水力学不同，流体力学是借助数学分析利用理论力学的方法来研究液体平衡和运动问题。在流体力学的发展过程中，彼得堡科学院的罗蒙诺索夫、伯诺里和欧拉起了巨大的推动作用。

伯诺里于1738年发表了关于液体运动的大量著作。欧拉于1755年导出了液体平衡和运动的基本微分方程，并引进了假想的理想（无粘性）液体概念，从而能得流体力学规律的数学解答。罗蒙诺索夫于1760年发表了《论物体的刚性和流动性》的学位论文，在这篇论文中阐明了作为水力学基础的质量守恒和能量守恒这一原理性的定律。

与理论流体力学发展的同时，实验水力学也取得了卓有成效的进展。在这里必须指出法国学者谢才、巴赞、达西在研究液体沿渠道和管道流动所产生的阻力方面所做的工作。在俄国，缅尼柯维依教授于1836年出版了第一部水力学教科书。并在彼得堡交通学院创立了第一个用于教学的水力学实验室。

在这个时期，流体力学的理论研究和实验研究之间出现了一定程度的脱节。门捷列也夫为使它们接近起来作出过尝试，1880年他首先指出了存在着具有不同阻力规律的两种液体流态的可能性。英国物理学家雷诺通过实验研究了这两种流态，并探讨了研究液体流动的相似理论。与此同时，俄国学者进行了许多重大的理论研究，如格罗米柯对液体运动的不同形式进行了深刻的分析，奠定了螺旋流理论的基础。彼得洛夫为牛顿的液体摩擦假说提供了理论上的依据，并探讨了润滑油的流体动力学理论。巴赫姆捷夫得出了明渠水流运动微分方程的解答，儒柯夫斯基则创立了举世公认的水击理论。

在这个时期的国外的研究工作中，同样必须指出霍尔赫盖

在研究流体阻力和渗流理论方面，韦伯在研究流体动力相似理论方面，普朗特在研究流体阻力和建立紊流半经验理论方面所做的工作。

苏联水力学学科在为我国水利部门所取得的成就中作出了重大的贡献。著名的苏联水力院士巴甫洛夫斯基创立了用于研究水工建筑物下渗流的水电比拟法，提出了一系列渗流以及明渠均匀、非均匀流的实际解答，出版了我国第一部《水力学手册》和其它水力学基础方面的专著。

在明渠液体流动的计算方面，同样必须指出诸如阿格罗斯金、达坚柯夫、列维、马卡维也夫、丘加也夫等这样一些苏联学者的研究工作。

明渠恒定流问题反映在赫内斯切诺维奇、阿尔汉格尔斯基、波利舍柯夫、瓦西里也夫、卡尔特威里希维里和其他学者的著作中。

诸如切尔托乌索夫、苏霍米尔、别梁谢夫斯基、叶姆佐夫、乌金丘斯、谢连柯夫这样一些学者则致力于水流在流经不同建筑物时所出现的各种现象的研究。

在管道水力学方面，阿里特苏里、姆林、费多诺夫、谢维列夫的工作则是人所共知的。

在紊流领域中所取得的进展反映在柯尔莫戈洛夫、维里卡诺夫、古尔先柯、叶列缅柯、罗依契斯基、曼宁、雅格罗姆、罗佐夫斯基的著作中。

各种研究成果都综合地反映在阿格罗斯金、波哥莫洛夫、米哈依诺夫、基谢列夫、巴甫洛夫斯基、波图克、丘加也夫和其他学者所著的水力学教科书和手册中。

在第十一个五年计划期间，对供水和国家的其它水利部门的发展提出了重大的课题，为了解决这些课题，水力学也将被

赋予重大的使命。

水力学在解决大量工程实际问题中不断地取得了新的进展和成就。这体现在，一方面是新的水力学计算方法的创立，另一方面是与电子计算机和新的计算方法的应用相联系的理论流体力学的发展，导致了使这些学科相互靠拢迈出了新的一步。在当前可以认为，现代水力学即是依赖于理论流体力学和提到高水平的实验研究的工程流体力学。所以，水力学课程包括了工程师在其实践活动中所必需的来自流体力学的全部知识。

## § 0—2 液体的基本物理性质

**液体的定义 流动性** 甚至在极微小的外力作用下都很容易地改变自身形状连续介质称为液体。液体最本质的特性是流动性，即液体质点的易流性，这是由于液体在静止状态不能承受切应力而引起的，液体不能保持其固有的形状，它取决于容器（贮水池、水库）的形状。

流体分为可压缩的和不可压缩的。空气和其它气体属于可压缩流体，通常所谓滴状液体（水、石油、润滑油等）属于不可压缩流体。严格地说，这类液体毕竟还是具有很小的压缩性，这种压缩性在液体流动的某些情况下是必须予以考虑的。

在本教程中只研究滴状液体的运动和平衡的规律。考虑到本课程的用途，在大多数实际情形中，仅针对象水这样的液体来研讨这些规律。

滴状液体有着固有的体积和自由表面，即同气体的分界面（图0·1, a、б）。

**密度与单位重** 液体最重要的物理特征之一是密度，即质量 $M$ 对其体积 $W$ 之比：



图 0·1

$$\rho = \frac{M}{W} \quad (0-1)$$

下面所列出的是某些液体的密度:

| 液 体            | 密度(公斤/米 <sup>3</sup> ) | 液 体              | 密 度<br>(公斤/米 <sup>3</sup> ) |
|----------------|------------------------|------------------|-----------------------------|
| 水 (t = 0 °C 时) | 999.9                  | 海水 (t = 20 °C 时) | 1002~1029                   |
| (t = 4 °C 时)   | 1000                   | 石油 (t = 20 °C 时) | 850~950                     |
| (t = 20 °C 时)  | 998.2                  | 水银 (t = 20 °C 时) | 13547                       |
| (t = 40 °C 时)  | 992.2                  | 液压系统的油           | 约850                        |
| (t = 90 °C 时)  | 959.1                  |                  |                             |

在水力学中同样采用液体的单位重  $\gamma$  的概念, 即液体重力  $G$  与其体积  $W$  之比, 因为单位重和密度表示为重力和质量对相同体积之比, 因此它们之间关系可表示为:

$$\gamma = \rho g, \quad (0-2)$$

其中,  $g$  ——自由落体加速度, 米/秒<sup>2</sup>。

单位重以牛顿/米<sup>3</sup>或公斤/(米<sup>2</sup>·秒<sup>2</sup>)计。

实际液体的密度在压强变化时变化很小, 这种情况可用如下关系式来描述:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \beta_p dp = \frac{dp}{E_x},$$

其中,  $\beta_p$  ——体积压缩系数。