

高等學校教學用書

液体与气体力学

上 册

Л. Г. 洛强斯基著

高等教育出版社

高等学校教学用书



液体与气体力学

上册

Л. Г. 洛强斯基 著
林鴻蓀 張炳煊等 譯

高等教育出版社

高等学校教学用书



液体与气体力学

下册

Л. Г. 洛强斯基著

林鴻蓀 張炳煌譯

高等教育出版社

本書系根据苏联国立技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的洛强斯基 (Л. Г. Лойцянский) 著“液体与气体力学” (Механика жидкости и газа) 1950 年版譯出。本書适用于从事有关流体力学專業的学生、教师和技术人員。

中譯本分上、下兩册出版。上册包括第一至第五章。

参加本書翻譯的有林鴻藻、吳望一、吳鴻庆、吳林襄、錢敏和張炳煊、由林鴻藻和張炳煊校閱。

液 体 与 气 体 力 学

上 册

Л. Г. 洛强斯基著

林鴻藻 張炳煊等譯

高等教育出版社出版 北京琉璃廠 170 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京華印書局印刷 新华書店总經售

統一書号 13010·383 開本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印張 $10 \frac{15}{16}$ 字數 272,000 印數 0001—2,000

1957 年 12 月第 1 版 1957 年 12 月北京第 1 次印刷 定價 (8) 洋 1.20

本書系根据苏联国立技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的洛强斯基 (Л. Г. Лойцанский) 著“液体与气体力学” (Механика жидкости и газа) 1950 年版譯出。本書适用于从事有关流体力学专业的学生、教师和技术人員。

中譯本分上、下两册出版。下册包括第六至第九章。

本册由林鴻蓀和張炳煊翻譯,校閱工作是由林鴻蓀担任的。

液体与气体力学

下 册

Л. Г. 洛强斯基著

林鴻蓀 張炳煊譯

高等教育出版社出版北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号13010·533 開本850×1168¹/₃₂ 印張124/16 插頁

字數306,000 印數0001—4,300 定價(6) 1.40

1959 年 4 月第 1 版 1959 年 4 月北京第 1 次印刷

序 言

本書是以作者在以加里宁命名的列宁格勒工学院講課時所用的講義作為基礎的。

由本書的書名可知，這些講義的內容是理論力學普通教程的自然延續，同時也可以知道，它並無企圖來滿足航空、造船、機器製造和其他工学院專業課程大綱的要求。在我們的時代里，技術每天都對液體與氣體力學提出各種嶄新的問題，要求工程師們善於獨立地、創造性地應用各色各樣理論的和實驗的方法去解決這些問題。

作者和從事流體力學實際應用的人們交往多年，經驗證明，他們碰到困難的主要原因，與其說是缺乏專門知識，倒不如說是對一般的物理基礎知識不夠了解。

培養學生成為蘇維埃工程師，研究工作，革新者，和為技術革新而鬥爭的積極戰士的工作，對流體力學普通教程的教學工作，首先提出了如下的任務：認真地、清晰地講授液體與氣體力學中的基本概念，闡明液體與氣體力學方法的特點，同時使同學正確地理解技術上所用的流體力學過程的物理實質。只有這種求深入而不是求廣博的講授，才能培養工程師具有容易掌握新事物和自己創造新事物的能力。

當然，另一方面，這並不是說，液體與氣體力學普通教程只應該包括一些基本定律的理論性的敘述並和實際應用脫節。但是，由於現代流體力學的应用範圍極為廣泛，這使我們不得不滿足於講授理論应用中個別的最重要的方面。例如，在這種意義上，本書就只選擇了對於流體力學在工程上的絕大多數應用方面來說是帶

有普遍性的一些問題，即液体或气体与在其中运动着的固体之間的相互作用力問題，或是液体或气体通过管道和渠道时跟管壁与渠壁發生相互作用力的問題。这样的方針也就确定了本書的全部內容。

本書的前三章講的是液体和气体的运动学，靜力学和动力学的一般原理，建立一些基本方程和表述一些最主要的定律和定理。为了尽可能使研究接近于高速运动中所發生的实际过程，势必把这些过程中的动力学現象和能量的热力学平衡問題密切地联系起来。

第四章講述可压缩气体在管內的一維流动問題，并講述小扰动及有限强度扰动在气体中的傳播問題；也講到稠密跳躍（激波）及超音速噴管中的現象和热流对于气体一維流动的影响等問題的基本概念。

第五章敘述了理想不可压缩流体平面無旋运动理論的經典結果，特別是平面平行流中机翼剖面理論的要旨。

第六章講到了可压缩气体的亞音速和超音速平面無旋流动問題的基本概念。这章的內容並沒有企圖去全面地敘述这一部門，它發展得如此迅速，理論上說来又是如此复杂。

第七章包含了理想不可压缩流体空間流动理論的基本問題。并敘述了此理論的实际应用，即关于液体流經軸对称渠道的問題，物体的定常和不定常的空間繞流問題，最后，还敘述了有限翼展机翼理論的初步知識。

整个第八章是用来闡明液体和气体的粘性对它和运动的固体間相互作用力的影响，也包含了边界層学說的基础知識，这一章是机翼的剖面阻力理論和举力理論的导引。

本書的最后一章（第九章）包含了有关流体沿光滑及粗糙管內作湍流运动一些最必要的知識，还包含了湍流边界層的半經驗理

論的最为必要的知識，这个理論使我們得以解决求單个剖面和叶棚的剖面阻力問題。本章結尾处論述了在射流及在物体尾部的湍流运动問題(这些問題是与边界層理論接近的)，以及均匀各向同性湍流中扰动的耗散問題。

苏联力学家对于能够出版一些几乎全部講述本国著名学者、現代流体力学創始者的杰出成就的教程这件事感到由衷的和应有的驕傲。緒言中刊载了历史概述，其目的是想以此說明如何在两个世紀中由于欧勒(流体力学創立者、彼得堡科学院院士)的工作和 H. E. 儒闊甫斯基(空气动力学奠基者，列宁称他为俄罗斯航空之父)，C. A. 察布雷金(儒闊甫斯基的天才战友)以及他們的繼承者，一批光荣的苏联学者們的出色的研究，使得苏联在現代流体力学的发展上占有领导地位。

作者希望本書对从事液体与气体力学技术应用的人們能有所裨益，还希望对于从事于流体力学中特殊部門研究工作的人們(在本書中沒有对这些部門加以論述)，本教程能够作为一个导引。

著者

列宁格勒，1950年4月29日

目 录

序言	vi
緒論	1
§ 1. 液体与气体力学的对象·液体与气体宏观模型的基本性質·綿續性及易流性	1
§ 2. 液体与气体力学的基本方法·应用范围及最主要的問題	3
§ 3. 液体与气体力学的发展史略·从古代的流体力学到牛頓时期一些观点的建立	6
§ 4. 欧勒和伯努利时代·十九世紀的流体空气动力学	9
§ 5. 液体和气体力学发展的現阶段	21
第一章 場論基础·連續介質的运动学	32
§ 6. 物理量的場·标量場及向量場·等位面·向量綫及向量管	32
§ 7. 場在給定方向和在給定点的均匀性的量度·标量場的梯度和向量場的微分張量作为場的不均匀性的量度	37
§ 8. 連續介質的运动·速度場·流綫与軌道	44
§ 9. 加速度場·質点的加速度分解为局部的和迁移的兩部分	47
§ 10. 在一給定点的鄰域中連續介質的速度場·角速度和渦旋·變形率張量和它的分量	50
§ 11. 流体的体积膨脹率·場的微分算式的积分表达式·一些基本的积分公式	58
§ 12. 渦綫和渦管·海姆荷茲第二定理·渦管的强度	68
§ 13. 渦管强度通过沿圍繞流管的周界的速度环流的表达式·关于速度环流随時間改变的定理	78
第二章 連續介質的平衡和运动的基本方程	80
§ 14. 連續介質中質量的分布·密度和比重·应力·应力張量及其对称性	80
§ 15. 連續介質的一般动力学方程·連續性方程·用应力表示的动力学方程	88
§ 16. 液体和气体中的热現象·能量守恒律和能量平衡方程	100
§ 17. 液体和气体平衡状态的一般方程·大气的平衡·近似气压公式·标准大气压	104
§ 18. 不可壓縮液体的平衡·分界面的方程·旋轉流体的平衡	113

§ 19. 不可压缩的重液体在物体表面上的压力。在重液体內漂浮的物体上所作用的力和力矩。旋轉液体的情形	118
第三章 理想液体和气体的动力学·基本方程和一般定理	124
§ 20. 理想流体·基本运动方程	124
§ 21. 运动着的理想流体的能量守恒定律·絕热运动·熵的守恒	132
§ 22. 体积分迁移变化率的欧勒表示法·物理量通过控制面的通量	138
§ 23. 理想流体定常运动中質量和能量守恒定律·动量和动量矩定律的欧勒形式	141
§ 24. 动能变化定理·內力的功及功率·动能变化方程的欧勒形式	146
§ 25. 理想液体及气体的定常正压运动中总机械能守恒的伯努利定理	148
第四章 理想流体的一維流动	156
§ 26. 理想可压缩流体的一維流动·綫性化的方程·液体或气体中微小扰动的傳播速度	156
§ 27. 等温音速及絕热音速·扰动源作超音速运动时的“扰动圓錐”·M数及其与扰动圓錐角的关系	163
§ 28. 有限強度的連續扰动的傳播·特征綫·閘断激波的形成	170
§ 29. 駐激波或稠密跳躍·突躍絕热曲綫	180
§ 30. 一維气流中的临界量·跳躍前后速度之間的关系·稠密跳躍中压力、密度及温度的变化	186
§ 31. 激波的傳播速度·激波后面气体的伴随运动	190
§ 32. 激波强度对气体压缩的影响·在亞音速及超音速气流中压力及速度的測量	194
§ 33. 沿变截面管的气体的一維运动·从大容量的貯气箱中經收縮噴管的流出	208
§ 34. 拉伐尔噴管中的一維流动·热量流入时的气体运动	216
第五章 流体的無旋运动·不可压缩流体的平面运动	224
§ 35. 在理想流体的流动中速度环流的守恒·凯尔文定理和拉格朗治定理·無旋运动·速度位势	224
§ 36. 無旋运动方程的拉格朗治-柯希积分·伯努利定理·單联通区域中不可压缩理想流体無旋运动的某些一般性質	231
§ 37. 不可压缩流体的平面無旋运动·速度位势和流函数·复变函数的应用·复位势和共軛速度	235
§ 38. 按照給定的流动特征函数确定流动場·一些最簡單的平面流动和它們的疊加	243

§ 39. 繞圓柱的無环流和有环流流动	254
§ 40. 曲綫坐标的应用・繞橢圓柱体和平板的無环流及有环流流动・儒闊甫斯基关于繞平板擺流动的問題	265
§ 41. 具脫体射流的平面运动・平板的間断繞流和流体穿过孔口的流动	278
§ 42. 不可压缩理想流体平面运动理論中的直接問題・保角映像方法的应用・察布雷金关于机翼后緣無分离繞流的假設・环流公式	285
§ 43. 儒闊甫斯基的机翼举力定理・举力与冲角的关系・举力系数	293
§ 44. 应用复变数方法导引儒闊甫斯基定理・流动在机翼上的压力总向量和压力力矩的察布雷金公式	301
§ 45. 流动压力总力矩的保角映像系数表达式・机翼的焦点相对于焦点的力矩与冲角無关・稳定拋物綫	307
§ 46. 把机翼剖面保角映像到圓上的特殊情形・儒闊甫斯基-察布雷金变换理論机翼剖面	312
§ 47. 任意微弯弧形的繞流問題(薄翼理論)	320
§ 48. 确定任意形狀机翼剖面的繞流	328
§ 49. 儒闊甫斯基定理推广到無数个剖面所組成的平面叶栅問題	336

目 录

第六章 可压缩气体的平面无旋运动	343
§ 50. 可压缩气体的平面定常无旋运动的一些基本方程·线性化方程	343
§ 51. 沿波紋形壁的线性化亚音速及超音速气流	346
§ 52. 在线性化亚音速及超音速流动中的薄翼·在亚音速流动中气体的可压缩性对举力系数的影响·在超音速流动中的举力系数和波阻系数	354
§ 53. 理想可压缩气体运动的未线性化的方程·轉換到速度面·察布雷金方程	360
§ 54. 赫里斯强諾維奇方法·計算可压缩性在压力分布上的影响的近似公式	365
§ 55. 临界 M 数及其按指定不可压缩繞流中压力分布的确定·在临界 M 数附近和超过临界 M 数时举力和力矩系数的动态	379
§ 56. 在可压缩气体低于临界状态的平面流动中的叶栅·儒閼甫斯基定理的推广	384
§ 57. 未线性化的超音速气流·平面超音速流动方程的“特征綫”·扰动綫及其基本性質	390
§ 58. 超音速气流繞凸角的动运·气流折轉角在其气体动力元素上的影响	397
§ 59. 在鈍角內的超音速流·斜激波·在斜激波前后的气体动力元素之間的关系	403
第七章 空間无旋运动	414
§ 60. 空間曲綫正交坐标·曲綫坐标中場的基本微分运算符	414
§ 61. 速度位势·源場和偶極子場·源和偶極子的連續分布·牛頓位势·單層位和双層位	420
§ 62. 圍繞給定渦系的速度場·畢奧—薩瓦爾公式·封閉渦綫的速度位势·与双層位势的比拟	427
§ 63. 流函数以及它和向量速度位势的联系·一些最簡單流动的流函数	432
§ 64. 繞球的流动·理想不可压缩流体的定常均匀流动对于浸在其中的物体表面上的压力·达朗倍尔疑難	436
§ 65. 軸对称运动的一般方程·圓柱坐标的应用·渠道內流动	444
§ 66. 縱向繞迴轉体的軸对称流动·迴轉橢球的情形	450
§ 67. 橫向繞迴轉体的流动·迴轉橢球的例子	457

§ 68. 縱向和橫向繞細長迴轉體的流動・近似的边界条件表达式・应用三角函数和来决定系数 A_n 和 C_n	462
§ 69. “奇点”法・应用連續分布的源(匯)和偶極子来解决縱向和橫向繞流迴轉體的問題	465
§ 70. 固体通过不可壓縮理想流体的一般运动情形・速度位勢的确定・物体上流动压力的总向量及总力矩	469
§ 71. “附加質量”系数・对称的性质・“附加”动能・平移运动的柱体、球以及橢球的“附加質量”的确定	474
§ 72. 有限翼展机翼理論的要素・机翼的渦系・平面截面的假設・几何冲角和实际冲角・举力及“誘导阻力”	482
§ 73. “举力綫”理論的基本公式・“誘导速度”与“誘导角”・根据指定的环流分布决定举力和誘导阻力的直接問題	489
§ 74. 具有最小誘导阻力的机翼・橢圓环流分布・誘导阻力系数与举力系数之間的关系・机翼理論的基本方程及其积分的概念	495

第八章 粘性液体和粘性气体的动力学 502

§ 75. 液体和气体中的內摩擦和热傳导・牛頓和富里叶法則・溫度对粘性系数和热傳导系数的影响・ σ 数	502
§ 76. 在介質任意运动情况下牛頓法則的推广・应力張量和变形率張量間的綫性关系法則	506
§ 77. 粘性流体的一般运动方程・动力学方程和能量平衡方程・有摩擦和热傳导的流体运动的边界条件	511
§ 78. 流体动力現象相似的概念・粘性液体和气体的无量綱运动方程・相似条件	518
§ 79. 柱形管中不可壓縮粘性流体的片流	525
§ 80. 小雷诺数情况繞球的流动・司篤克斯的球阻力公式及其推广	534
§ 81. 理想流体和粘性流体中的渦綫・无內摩擦情况渦綫守恒的性质・粘性流体中渦旋的扩散	543
§ 82. 可壓縮粘性气体一維直綫运动・激波內的运动・激波厚度的概念	551
§ 83. 运动粘性介質中內力所作的功和机械能的耗散	556
§ 84. 大雷诺数下液体或气体繞物体的流动・片流边界層理論的基本方程	561
§ 85. 不可壓縮流体縱向繞平板时的片流边界層・非等溫运动	578
§ 86. 在外部流动速度指定为幂次式 $U = cx^n$ 的情况下的片流边界層	583
§ 87. 指定外部流动速度一般情况下的片流边界層・应用冲量方程近似地計算片流边界層	592
§ 88. 决定函数 $\zeta(f)$, $H(f)$ 和 $F(f)$ 的方法・片流边界層的近似計算法	601

§ 89. 高速可压缩气体纵向绕平板时的片流边界层·粘性系数与 温度成线性关系的情形($n=1$)	611
§ 90. 当粘性和温度按任意法则相联系而 $\sigma=1$ 时平板上的 片流边界层·绕流翼型的高速流动	622
第九章 湍流	628
§ 91. 片流到湍流的过渡·临界雷诺数	628
§ 92. 过渡区和过渡“点”·“绕流危机”的现象	634
§ 93. 平均湍流的基本方程·湍流应力张量	642
§ 94. 平面管和圆管中的湍流·对数速度公式	650
§ 95. 流体湍流运动下光滑管的阻力公式·片流副层	658
§ 96. 管壁粗糙度对管阻力的影响·流动的极限情况· 定常粗糙度的形态	664
§ 97. 纵向绕流平板时的湍流边界层·平板的阻力	670
§ 98. 小纵向压力落差下翼剖面上的湍流边界层	679
§ 99. 大纵向压力落差下翼剖面上的湍流边界层	684
§ 100. 机翼的型阻·将型阻分解为摩擦阻力和压差阻力·边界层 对绕流翼剖面表面上压力分布的逆作用	688
§ 101. 机翼剖面和叶栅内剖面型阻的近似公式	696
§ 102. “自由湍流”的基本规律性·充满同一流体的空间内的 平面湍流射流	704
§ 103. 绕流物体后的湍流遗迹	716
§ 104. 流体中湍流扰动的耗散·各向同性均匀湍流的情形· 扰动矩守恒定律	720

緒 論

§1. 液体与气体力学的对象·液体与气体宏观模型的基本性質·連續性及易流性

科学研究工作之所以取得成果，大多是依靠善于选出现象的主要部分和善于撇开一些細枝末节。这些細枝末节本身固然重要，但就該項研究的目标說来，則是次要的。譬如說，研究某种机构运动的工程师，他起先把这个机构的个别元件当作“絕對剛体”看待，确定了机构运动的运动学圖象和它內部力的作用，此后，如果希望計算机构的強度，他就摒棄了环节的“絕對剛性”，而考虑到它們的彈性，在某些場合下还考虑到它們的塑性。在进行这些計算的时候，他必須运用彈性体和塑性体現有的圖象，这些圖象的基础乃是把现实的固体看作是一些連續不断地組成的、遵守彈性和塑性理論規律的物体。固体“宏观力学”的一些基本法則，在古典理論是被用来作为某些基本假說的，但可以从原子的“微觀力学”定律用各种各样的近似方法推导出来。

物体內部微觀結構的研究，不包括在固体或固体系力学的任务之內，这些力学的研究对象仅仅是“表象的”运动，这些运动取决于“宏观物体”相互位置的变化，或者取决于它們的变形。

液体与气体力学和固体力学一样，都是普通力学中的分支，它研究液体和气体介質的“宏观运动”以及它們和固体間的相互作用力。把真实液体和气体的“微觀結構”問題，也就是关于个别分子的混乱热运动的問題（这問題本身是液体和气体的分子运动学說的对象）放在一边，液体和气体的“宏观力学”只需要利用把从分子运动学說的統計观点推导出来的法則以及某些实验事实作为基本假

設。

从“宏观力学”这一观点出发，液体和气体，也和固体一样，都是某种連續的介質，照例其中有一些基本的物理量^①連續地分布着。在液体和气体力学中，我們考虑液体或气体介質中的“个别微团”（和一般力学的“質点”特別相似）这一概念。同时也考虑这些微团的組合：“流体綫”“流体面”“流体体积”。这里特別應該說明一下“元体积”这一概念。

所謂液体或气体中的無限小体积或者元体积，是指这样的体积，它的大小和流体所流过的渠道的大小相比較，或者和被流体繞过的物体的大小相比較乃是微不足道的，但比起分子自由程長度却要大得多，同时还包含足够多的分子，使得我們能够应用和介質的“連續性”这一概念相联系的統計平均法。在有些場合下（如薄層、流动的运动学特性及动力学特性突变区域），必須研究一些区域，这些区域小得在原則上已經不能应用連續介質的普通法則，对于这些情况，就必须直接地应用液体和气体的分子运动学說。

流体的宏观表象和固体（也是以連續介質的形式表現出来）的宏观表象之間的基本区别，就在于液体和气体有易流动性。固体，不管整体如何运动，只發生比較小的变形（也就是說，設把固体中每点在固体运动后的位置与在固体平移和轉动后所应有的位置兩相比較，則該点的位移都是很小的）；相反地，液体（或气体）能够有任意大的变形，它們能沿着以剛壁为界的渠道流动，或者和另一液体或气体在交界处形成分界面。

液体和气体对于外界从各个方向施于其上的压縮，都給与显著的抵抗，但是对于微团之間的滑动，抵抗得就比較弱，而且对这滑动的抵抗力（更准确些說，切应力）随着互相滑动的相对速度一齐消失。因此，很小的力就能够破坏流体微团之間相对靜止的状态。

① 例外只可能是若干“奇”点，“奇”綫和“奇”面。

这就是液体或气体和(譬如說)松散体之間的基本差別, 松散体的微团間有“干摩擦力”。要使松散介質运动, 必須先克服微团間某种有限的靜摩擦力, 在这以后, 松散体的微团之間才开始有相互間的位移。但在液体和气体中, 这种与相鄰微团間的相对速度無关的固定不变的靜摩擦力却并不存在。

上述的液体“宏观模型”或气体“宏观模型”的两个基本特性——綿續性及易流性, 已足够建立液体和气体的运动基本方程和平衡方程, 这在下面立刻就要加以說明。

要使这些方程更精确, 并要把它們化为封閉形式, 还需要进一步作些性質上和数量上的假設, 这些假設是和液体和气体的各种更特殊的物理性質相对应的。

§ 2. 液体与气体力学的基本方法 • 应用範圍 及最主要的問題

为了解决流体空气动力学及气体动力学中大多数的問題, 人們应用一种严格的数学方法, 在一組規定的边界条件和初始条件下积分基本微分方程, 或者应用其他与之相当的数学方法(例如, 在理想流体平面运动問題中的保角映射)。为了得到全面的特征, 人們利用如动量及动量矩定理, 能量定理等等这些力学的一般定理。但是由于許多現象極為复杂以及对它們研究得还很不充分, 液体和气体力学不能滿足于仅仅应用理論力学和数学物理中的严格方法, 虽然这些方法对于(譬如說)刚体力学的發展是十分典型的, 而且还要广泛地应用了所有可能的經驗方法及所謂“半經驗的”理論, 在建立这些理論时, 一些个别的实验事实起了很大的作用。这样摆脱經典“合理”力学純粹演譯方法, 对于像現代的液体和气体力学这样蓬勃發展的科学說来, 是很自然的。

在理想(無內摩擦)不可压缩液体运动問題中, 經典理論很早