

中级科学技术丛书

流体力学浅说

蔡銘之編著

江苏人民出版社

2

BB748/07

· 內 容 提 要 ·

本书較系統地介紹了流体力学基本理論，主要内容有：流体的平衡，理想流体的运动，粘滯流体的运动，运动物体在流体中所受的阻力和机翼原理等。在敘述解释这些原理时，避免了应用高等数学。可供高中文化程度的干部、工人、农民閱讀。

中级 科学技术丛书
自学

流 体 力 学 淺 說

蔡銘之編著

*

江苏書刊出版登記證出登江001

江苏人民出版社

南京湖南路

新华书店江苏分店发行 宁印刷厂

*

开本 787×1092 1/32 印張 3 字數 65,000

一九五八年五月第一版

一九五八年五月南京第一次印刷

印數 1—17,000

統一書號： 13100·40

定 价：(9)三角四分

封面設計 徐鳳琴

前 言

流体运动现象在实际生活中起着十分重要的作用。在许多技术科学部门，如航空运输、水利灌溉以及各种工作机械上，都会遇到一系列有关流体力学的问题。因此，很自然地，这门科学正日益受到广泛的重视。

目前出版的流体力学书籍，多数是高等学校有关专业的教科书。它们一般地着重在介绍解决问题的方法。阅读这些书籍需具备一定的高等数学基础。在中学物理教材和大学普通物理教材中有关流体力学部分，也没有很多篇幅来阐明所利用到的基本概念的物理内容。现在有些已学过高中物理学的人希望有一本专门讲述流体力学的书，以便进修。

这本“浅说”没有罗列过多的流体运动现象，也没有介绍任何仪器的构造和使用方法。因为这样做的结果徒然使篇幅增多，且不一定能收到实际的效果。它所叙述的范围较普通物理的有关部分要广泛些，除流体的平衡问题和理想流体的运动外，也介绍了粘滞流体的运动、运动物体在流体中所受的阻力和机翼理论等内容。在流体的平衡这一章中，引入了体积力的概念，指出体积力和压强变化的关系，这样可以进一步分析被加速系统中的流体平衡问题。在理想流体的运动一章中，除了较详细地叙述伯努利方程外，还着重说明动量定理在计算反冲力时的应用。这个定理又被用来计算固体和流体的相互作用，并据以推导出儒可夫斯基的升力公式。附面层、涡旋理论和环流对于理解运动物体所受阻力的性质与机翼的升

力和阻力的产生原因,都十分重要。对于这些問題,在这里都作了比較詳細的分析說明。

流体力学的研究是建立在力学的基础上的。本書除应用力学基本原理来叙述和分析外,曾強調了流体运动的特点。在緒論中便較詳細地叙述了流体的基本物理性質——压缩性、粘滯性和流动性。在以后的叙述中又时时回顧到这些基本性質,指出在那里起主要作用的性質。这样把流体运动的特点归結到它的物理性質来加以說明,希望比較地能說明現象的本質并使全部材料的体系来得較完整些。書中避免应用高等数学,使具有高中程度的讀者,閱讀时不致有很大困难。

限于我的水平,這本書在材料的选择、組織和文字表达上,一定还存在很多的缺点。希望讀者多多提出意見,使它可以得到改进。

1957年12月蔡銘之于江苏师范学院

目 录

緒論	1
§ 1. 流体力学的对象 流体被看作为質点組	1
§ 2. 流体的基本物理性質: 粘滯性和壓縮性	3
§ 3. 流体力学的研究方法: 观察、实验和理論的 分析方法	11
第一章 流体的平衡	13
§ 4. 流体內部的压强	13
§ 5. 流体內部的压强分布 表面力和体积力 旋轉 液面	14
§ 6. 在流体中的固体所受的力 旋轉液体中的浮力 离心分析器	21
第二章 理想流体的运动	28
§ 7. 观察流体运动的方法 稳恒流动 流綫	28
§ 8. 連續性方程 柏努利方程 柏努利方程的应用	30
§ 9. 流体的动量变化 动量定理	36
第三章 粘滯流体的运动	44
§ 10. 截面不变的管中的压强梯度	44
§ 11. 片流 泊稷叶公式	47
§ 12. 湍流 雷諾耳数	50
§ 13. 附面层	54
§ 14. 渦旋	56
§ 15. 环流 速度环量	58

§ 16. 渦管 渦管強度 渦旋定理	62
第四章 流体对运动物体的阻力	64
§ 17. 阻力 牛頓阻力定律	64
§ 18. 形变阻力和摩擦阻力	65
§ 19. 物体在粘性很小的流体中的运动 慣性阻力	66
§ 20. 阻力与物体的形狀和位置的关系 流綫体	67
§ 21. 形变阻力、摩擦阻力和慣性阻力定律	69
第五章 机翼理論	75
§ 22. 升力和阻力 升阻比 影响升阻比的因素	75
§ 23. 气流繞过物体边缘时的渦旋 起勁渦旋	80
§ 24. 环绕飞机机翼的无旋环流	82
§ 25. 机翼的升力 儒可夫斯基的升力定理	84
§ 26. 机翼的阻力 展弦比和誘导阻力	89

緒 論

§ 1. 流体力学的对象 流体被看作为質点組

流体力学的任务是研究流体的相对静止和运动的規律，以及流体和固体之間的相互作用力的問題。在自然界，绝对静止的物体是不存在的，一切物体(包括流体在內)的运动状态总是相对于某些标准物体而进行观察研究的。这些标准物体在力学上被称为参考系。地球便是我們最常用的参考系。因此，我們所說的静止和运动是指相对于参考系的相对静止和运动。这里所說的固体是指那些和流体相接触而和它們处于相对静止或者处于相对运动状态的物体，例如，盛着水的容器的器壁，河堤、水壩，在水中运动的船只，在空气中运动的飞机等。这些物体都將給予水或空气以作用力，从而影响和約束了水或空气的运动状态。同时，这些物体本身也受到了水或空气所給予的反作用力。

在力学中，我們研究过質点和剛体的运动。在那里，剛体是被看成由大量的質点組成的物体，或者叫質点組，而質点和質点之間的距离，在剛体中被当作是不会改变的。因而，剛体的形状是不会改变的。流体和剛体不同，流体也是質点組，但是流体的形状可以任意改变，它們的特性是所謂流动性(关于流动性的恰切意义，我們在§ 2討論)。因此，剛体的运动規律不适用于流体。但是，既然我們將流体也看或大量質点的集合体，力学中关于質点組的运动的一般規律也便同样适用

于流体。不过，力学定律在流体力学中的表现形式和在刚体力学中的表现形式已经不同。可见流体运动定律和刚体运动定律都是力学中质点组运动定律的特殊形式，力学是研究流体力学的基础。

上面講到，我們把流体看成質点組，然后应用力学中的一般定律来找流体的运动定律。流体的內部結構究竟是怎样的，它們是不是由大量質点所組成，根据什么理由可以將它們看成質点組呢？

平常所說的流体包括液体和气体。液体和气体都有很复杂的內部結構。簡單地說，它們都由大量分子組成，这些分子不断地作不規則的热运动。每个分子又包含一个或两个以上的原子。分子和分子之間以及分子內部的原子和原子之間可以保留相当的空隙。所以，流体的內部結構是不連續的，中間存在着許多空隙。流体力学不去研究个别分子的运动，也不过問个别原子的运动。流体力学只研究大量分子的集体的运动。我們將整个流体分成許許多多的分子集团，称呼每个分子集团为質点，研究这些質点的平衡和运动以及它們相互之間或者和周圍物体之間的作用力。这样的質点在流体內部一个紧靠着一个，它們之間不再有任何的空隙。必須指出，不要把質点誤解为个别的分子，每个質点实际上是一个大量分子的集团。为什么称这样的集团为質点呢？因为，流体力学所研究的运动是大範圍的运动，和流体之間有力相互作用着的固体也是很大的物体。因此，每个質点可以充分精确地被認為是一个点而不必考虑它的大小。它們不同于几何上的点，它們具有質量。从流体的运动範圍和周圍物体的大小来看这些分子团——質点，这时它們显得非常地小。但是另一方面，从分子之間的平均間隔来看，它們又應該是很大的。每一分子

团中的各个分子虽然不断地作着不规则的热运动，但是它们不会越出这个分子团即质点的范围。因此，将流体看成质点组之后，我们便不必去考虑分子的热运动和分子间复杂的相互作用力，只将质点作为一个最小单位来研究它的运动。也就是说，流体力学所研究的不是具有不连续的內部结构的实际流体，而是上面所说的由质点组成而具有连续结构的实际流体的模型。正如在刚体力学中，在不考虑形变或形变很小不起主要作用的情况下，可以把刚体作为实际固体的模型一样。这样便可以使问题大大地简化。当然，采用这样的模型来代替真实的流体是有条件的，即只在和分子运动没有直接关系的情况下是可以被容许的。对于那些和分子运动直接相关联的物理现象如热传导、扩散等，单纯用质点的运动是完全不足以说明问题的。这些现象都不属于流体力学的研究范围。

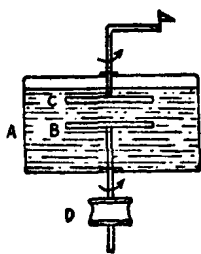
§2. 流体的基本物理性质：粘滞性和压缩性

流体和固体间的根本差别在于流体具有流动性，而固体没有流动性。如何理解流体的流动性呢？所谓流动性并不是指物体能不能改变它们的形状，即能否发生形变而言，因为所有的固体在外力作用下都能发生形变。不过，在形变时，流体和固体所表现的性质是截然不同的。固体受力作用发生形变时，产生一种和形变大小成正比的弹性力来阻止发生形变。当这个阻力增大到足以和外加力相抵销时，形变便不再增大。所以，固体形变的大小和外加作用力有关（正比关系）。外加作用力愈大，形变愈大。反过来说，要得到较大的形变，就需要用较大的力。例如，使一个弹簧伸长，必须要用力。要它伸长得长些，所需的力便要大些。在固体的情形下，所需的力的大小完全决定于对形变的要求，与发生形变的快慢无关。对

于流体，情形便完全不同了。当我们企图将一大块瀝青一下子压成薄餅的形状时，会遇到非常大的阻力。也就是說，必須用很大的力才能做到。但如我們將这块瀝青放着不去碰它，在較長的时间后，它便在重力的作用下散开成为很薄很大的一片。这种事实說明，流体形变时也产生阻力，但这种阻力和形变的快慢有关系。要使流体很迅速地发生形变，需要用很大的力，而在用力的时间充分長，或者說，形变的过程充分慢时，任何小的力能够使流体产生非常大的形变。瀝青是一种粘滯性比較大的流体，它在形变时所表現出来的这种特性是一般固体所不具备的。这种性質便称为流动性。流动性又是所有流体如瀝青、甘油、水和空气等所具有的共同特性。

各种流体的粘滯性可以有很大程度的区别。例如，瀝青的粘滯性很明显地比空气或水的粘滯性要大得多，一块瀝青需要很長的时间才散开成一片，水則很快地便散成一层。水的粘滯性比甘油的粘滯性也来得小。推动一块浮在水面上的小木板作等速运动时要用力。如果其它条件不变，使浮在甘油表面的木板，保持同样大小的速度运动时，便要用較大的力。这个力，即使在木板作等速运动时也是必須加的，它被用来克服流体内部的一种阻力。我們称这种阻力为粘滯阻力或內摩

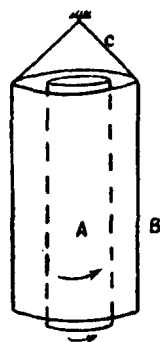
擦力。上面所举小木板运动的例子說明流体内部存在着这种阻力，它的大小和流体的粘滯性有关。在其它条件都相同时，粘滯性大的流体产生的粘滯阻力也較大。粘滯阻力的存在和它的性質可以通过下面的实验（图 1）而看得更清楚。在玻璃容器 A 中盛满水或其它液体，放两个相隔不远的圓盤 B 和 C。下面的圓



（图 1）

盤 B 裝在通過容器底部的軸上，軸的下端裝着皮帶輪 D，可由皮帶帶着轉動。上面的圓盤 C 裝在一根通過容器蓋的軸上。當下面的圓盤被帶動時，上面的圓盤便會跟着朝同一方向轉動起來。這個裝置也可以被用來演示氣體內部的粘滯阻力的作用。但是氣體的粘滯性要比水的粘滯性小得多，為明顯起見，可以改用如圖 2 的裝置。用細綫 C 將圓筒 B 懸挂起來，筒內插入一根圓柱體 A，使它們的軸綫重合。

帶動圓柱體 A 迅速旋轉時，圓筒 B 也會朝同方向隨着轉動，使懸綫 C 受到扭轉。在這兩個實驗中，為什麼一個物體轉動時，能帶着另一物體同時轉動呢？精確的觀測告訴我們，原來在物體的表面上，都粘附着一層流体（液體的或氣體的）。這層流体隨着物體開始轉動時，這一層流体外面的流体並沒有動。它和鄰近一層流体間出現相對運動，因此便產生了粘滯力。鄰近的流体

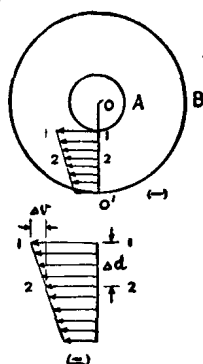


(圖 2)

層因粘滯力的作用而跟着轉動起來。這樣，一層帶動一層，最後粘附在另一物體表面的一層流体以及另一物體也被帶動起來。仔細觀察時能夠發現這兩個物體的轉速並不相同。被帶動的那一個物體（圖 1 中的圓盤 C，圖 2 中的圓筒 B）的轉速要比帶着它轉動的物體的轉速小一些。可以想象得到，如果將兩物體間的流体分成許多層，從第一個物體起，通過中間這些流体層到第二個物體時，旋轉速度必然在漸次減小。流体內部層與層之間有相對運動是產生粘滯力的一個條件。第一個物體在帶動周圍的流体以及另一物體同時轉動時，將受到一個和它的運動方向相反的阻力作用。這個阻力便是粘滯阻力。物體不只在轉動時遇到粘滯阻力，它在平動時也同樣

地受到粘滯阻力。例如流体在管子里流动时，靠管壁的一层流体粘附在管子上面完全不动，愈靠近管子中心处的流体层的速度愈大。中間流体要受到外层流体的粘滯阻力。上面的分析和实际观测得到的结果完全相符合。

流动流体的层与层之間的速度不同这一事实，可以用图解法明显地表示出来(图 3)。作一根和流体运动方向相垂直



(图 3)

的直綫，然后在直綫上各点作橫綫，讓它們的長短分別表示各該点处的流动速度的大小。在图 2 的情形中，圓柱 A 和圓筒 B 的軸綫一致，任意半徑 OO' 將与 A、B 之間流体的流动方向垂直〔图 3 中 (一)〕。在 OO' 上作表示流体流动速度的橫綫 (与 OO' 垂直)，近 A 处的速度最大，橫綫画得最長，順次向外，愈来愈短。速度改变的快慢，可以用所謂速度梯度来表明，如图 3 中 (二)。流体层 1—1 和 2—2 的速度差为 Δv ，兩层相距 Δd ，我

們称速度差和距离之比 $\frac{\Delta v}{\Delta d}$ 为速度梯度。因此，速度梯度可以簡單地說成：在和流动方向相垂直的方向上，每隔單位長度时的速度变化，它和运动学中加速度的涵义是完全不同的。

大量的实验結果表明，流体层与层間的粘滯阻力和速度梯度成正比。速度梯度愈大，粘滯阻力愈大。它同时和层与层的接触面积成正比，在图 2 的情形中，这个接触面是圆柱面，它的大小随流体层离中心的距离不同而不同。如果用 f 表示这个粘滯阻力，則上面所說的实验結果可以表示为：

$$f = \eta \frac{\Delta v}{\Delta d} S$$

式中比例常数 η 随流体性質而改变，它表示着流体的粘滯特性，称为粘滯系数。在 $\text{e} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$ 單位制中， η 用厘米⁻¹—克—秒⁻¹量度。这个單位又簡称为泊。从式中可看出，粘滯系数 η 便等于速度梯度为 1 时單位接触面积上的粘滯阻力。

我們平常称流体的粘滯阻力为內摩擦力，因为这种阻力类似固体間的摩擦力。但是，和固体的情形不同，这里根本不存在所謂靜摩擦力。例如，載重数吨的船，用一个很小的力便能推动它。推动同样重的一輛車子，便須克服很大的靜摩擦力。从上面的公式也能看出，內摩擦力和速度梯度成正比，速度梯度无限减小时，內摩擦力也无限减小。可見流体的內摩擦力只能延緩层与层之間的滑动，阻止速度梯度的增大而不能根本阻止这种滑动。所以非常小的力能够緩慢地产生很大的形变，上面所举瀝青发生形变的事实便是一个例子。这正是流体的流动性的一种表現。

流体虽然都具有粘滯性，但是，在許多情形中，粘滯性并不起主要的作用。例如，水和空气是两种最常見而且最重要的流体，它們的粘滯性便十分小。在許多問題中，不考虑它們的粘滯性的作用可以使問題簡化，而且不致引起显著的錯誤。这种假想的沒有粘滯性的流体，我們称之为理想流体。

流体的另一种特性是它的压縮性。液体的压縮性和气体的压縮性相差很大。实验指明，液体体积随压强变化的情况可以充分精确地用公式表示为：

$$V = V_0 [1 - \beta(p - p_0)]$$

p_0 为标准大气压， V_0 为压强等于 p_0 时的体积， β 称为液体

的壓縮系数。由上式解得：

$$\beta = -\frac{V - V_0}{V_0(p - p_0)} = -\frac{\Delta V}{V_0 \Delta p}$$

所以，液体的壓縮系数在数值上等于增加單位压强时体积的减小和原体积之比。平常用大气压为压强單位。水在压强增加一个大气压时，約减小它原体积的十万分之五，即 $\beta = 5 \times 10^{-5}$ 。液体的壓縮系数在压强从 0 到 500 大气压这个范围内，是一个常数；压强在 500 大气压以上时， β 之值將改变。可見液体的壓縮系数很小。在实验时，如果不用精密的仪器，是不容易发现液体的体积变化的。

各种液体的壓縮性都十分小，气体的壓縮性却十分显著。气体的体积变化与过程有关。理論上最重要的两种过程是絕热过程与等温过程。在前一种过程中，气体和周圍物体間沒有进行热量的交换；在等温过程中，气体和其他物体間进行了热量交换而保持其温度不变。在絕热过程中，气体体积遵循公式

$$pv^\gamma = \text{常数}$$

而变化。 γ 为气体的定压比热 C_p 和定容比热 C_v 之比 ($\gamma = \frac{C_p}{C_v}$)。例如，声波在空气中傳播时，空气便經歷着絕热过程。在温度一定时，气体体积和压强成反比地改变。压强增大一倍时，气体体积减小为原来的二分之一。这便是玻意耳——馬略特定律。它可以用下面的公式表示：

$$pv = \text{常数}$$

式中 p 、 v 分別表示气体的压强和体积。这个公式和实际的測量的結果并不完全符合。一般气体只在压力不太大和温度不太低时方近似地遵从玻意耳——馬略特定律。

外加压力增大时，流体受到进一步的压缩。处于压缩状态下的流体，能产生向外膨胀的力，这种力可以被看成是一种弹性力。当压力恢复到原来的大小时，流体能象弹性固体似地恢复到原来的体积。作用在容器和其他固体上的力，便是这种弹性力的表现。这种力的产生原因十分复杂。在液体中，可以认为是排列得很紧密的液体分子间相互作用着的排斥力；在气体中，这种力是不断作不规则运动的气体分子对固体发生碰撞的结果。这种碰撞因为体积缩小而更加频繁，所以压强应该随体积的减小而增大。研究这些力的性质不是流体力学的任务，以后我们将不再讨论这个问题。

尽管液体的压缩性十分小，在许多场合考虑到液体的压缩性以及由此产生的弹性力，可以使我们对许多现象容易理解，例如液体为什么会产生产压力等问题。当然，在分析这些问题时，还应考虑到流体的流动性。有时，在某些问题中，液体的压缩性不起主要作用，为了讨论方便，可以完全不考虑液体的压缩性，而将它们看成是不可压缩的。甚至是空气，当运动物体的速度不很大时（100 每秒米以下），也可以被看成是不可压缩的。事实上，在这种情形下，运动物体周围的压强差并不大，所以，空气的密度没有发生显著的变化。但是，当运动速度再增大时，空气受到愈来愈大的压缩。当速度接近声速时，这种压缩达到十分显著的程度，这时如果忽略了空气的压缩性便会得出和事实完全不相符合的结论。

〔例题 1〕 在图 2 中的圆筒 B 和圆柱体 A 之间充满粘滞系数 $\eta = 8.6 \times 10^{-5} \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$ 的气体。圆柱 A 的半径 $r_1 = 8$ 厘米，圆筒间距离 $\Delta d = 0.2$ 厘米。圆柱 A 以转速 $n = 10 \frac{\text{转}}{\text{秒}}$

动时,求外圓筒B的内表面上每平方厘米所受的力。

〔解〕 圓柱A轉动时,其表面上各点的綫速度为 $v_1 = 2\pi r_1 n$ 。圓筒B不动,表面上的綫速度 $v_2 = 0$ 。所以速度梯度等于

$$\frac{\Delta v}{\Delta d} = \frac{2\pi r_1 n}{\Delta d}$$

將圓柱A和圓筒B間的气体层近似地看成平面的。由公式

$f = \eta \frac{\Delta v}{\Delta d} S$ 得單位面积上的作用力为:

$$\begin{aligned} \frac{f}{S} &= \eta \frac{\Delta v}{\Delta d} = \eta \times \frac{2\pi r_1 n}{\Delta d} \\ &= 8.6 \times 10^{-5} \times \frac{2\pi \times 8 \times 10}{0.2} = 0.2 \text{ 达因/厘米}^2 \end{aligned}$$

这个力的方向和圓筒表面相切。

〔例題2〕 原来体积为50公升的水,当压强由1个大气压增加到100个大气压时,它的体积改变多少?

〔解〕 在公式 $\beta = -\frac{\Delta v}{v_0 \Delta p}$ 中,已知 $\beta = 5 \times 10^{-5}$,

$v_0 = 50$ 公升, $\Delta p = 100$ 大气压。由此解得:

$$\begin{aligned} \Delta v &= -\beta v_0 \Delta p = -5 \times 10^{-5} \times 50 \times 100 \\ &= -25 \times 10^{-2} = -0.25 \text{ 公升} \end{aligned}$$

所以体积改变了0.25公升。答数中的負号表示体积縮小。

习 題 一

1. 如海面的海水密度为1.02克/立方厘米,假設海水的含鹽量和溫度在全部深度內保持不变,求深度为9,000米处的海水密度。($\beta = 5 \times 10^{-5} 1/\text{大气压}$)。

(答) $\rho = 1.67$ 克/立方厘米

2. 在怎样的深度处, 水的密度較表面的密度大1%?
($\beta = 5 \times 10^{-5}$ 1/大气压) (答) 約220米

3. 有一块寬1米, 長2.3米的木板, 以1.5米/秒的速度在水面上运动。假定有一层厚度为0.008米的水被帶动起来, 这一层内的速度均匀地改变。水的粘滯系数为 1.6×10^{-3} 千克/米-秒, 求木板所受的阻力。

(答) 0.07 千克

§3. 流体力学的研究方法: 观察、实验和理論的分析方法

和所有其他科学部門一样, 流体力学的发展依靠理論和实践的紧密联系。理論分析和对实际过程观察实验的相互結合, 同时运用, 使这门科学得到了很大的发展。为什么要这两种方法同时并用呢? 因为理論虽然能够概括大量事实, 但是理論的分析方法是以抽象了的同时也是被簡化了的自然律規为基础的。因此, 理論常是以某些假設为前提的。当这些前提条件不具备时, 它便不能得出正确的結論。理論有它的局限性, 其适用范围需要由实践来加以檢驗。例如, 在流体力学中, 为了使問題簡化, 我們可以忽略流体内部的粘滯阻力而將流体看成理想流体。根据这个假設而建立的关于理想流体运动的理論只在某些場合是正确的, 而在另外一些情况下, 流体的粘滯阻力不能被忽略, 关于理想流体的理論, 便完全与事实不符。又如, 在物体运动速度不大时, 流体的密度的变化很小, 因而可被看作是不可压缩的。但是, 当速度超过一定界限时, 流体的压缩性便完全不能被忽視。只有实验方才能够确定这个界限。此外, 也只有实际的观察实验才能提供理論分