

全国高等林业院校试用教材

普通物理学

王长涵 主编

中国林业出版社

全国高等林业院校试用教材

普通物理学

王长涵 主编

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学/王长涵主编.-北京:中国林业出版社,
1995.12

全国高等林业院校试用教材

ISBN 7-5038-1525-6

I. 普… II. 王… III. 普通物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第12594号

中国林业出版社出版

(100009 北京西城区刘海胡同7号)

北京市卫顺印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

1996年5月第1版 1996年5月第1次印刷

开本:787毫米×1092毫米1/16印张,19.5

字数:465千字 印数:1-3000册

定价:14.85元

前 言

本书是在全国高等林业八院校合编，1990年出版的《物理学》一书的基础上，重新修订，改编而成的。

在原《物理学》一书的前言中曾指出：该书是根据林业科学技术的发展对物理教学提出的新要求，并依据1986年林业部组织讨论的全国高等林业院校林学类专业物理学教学大纲的精神编写的。本书可作为林学、森保、水保、园林等专业及农、牧、水产等专业的教材，也可作为林专、林校、农校及农林科技工作者参考用书。讲课总学时为80学时左右。上述原则，也是本书编写的依据。

在本书编写过程中，及时总结了八院校五年来采用《物理学》一书的教学实践的经验，参阅了大量国内外物理学方面及结合林学、生物学方面有关书籍和文献资料；注意采用物理学中新概念、新理论，如引进了液体分子的有效内聚力概念，渗透压的微观解释理论等。充实、提高了结合专业的内容。对原《物理学》一书在理论体系上，基本内容上都进行了较大的增删、合并和调整。如删去《质点力学基础》、《刚体转动》等两章；把《电测法》、《光学仪器》两章化整为零，融入相应的章节中去；《电磁学》一章回归为《电学》和《磁学》两章……。增加了辐度学，充实了生物热力学，生物电学，生物磁学等内容。使本书从原《物理学》的16章改写为现在的11章。

新编后的本书，更突出了以下两个特点：

1. 在注意保持物理学科系统性，科学性的前提下，限于学时，根据专业特点，不过分强调普通物理系统本身的重点和完整，根据专业的需要，有所取舍和侧重，更加突出了取材上的专业针对性。

2. 加强了物理学在林学、生物科学上的渗透和应用。注意从物理学的基本概念、理论出发，对林学、生物学的一些物理现象和本质做一定的描述、探讨和解释；注意把物理学的研究方法、手段和最新成就介绍到林学中来；注意介绍国内外林学、生物学研究中应用物理学理论方法、手段的新成就，新发展。使物理学的理论方法和手段有机地渗透到林学，生物学中去，克服以往教材中物理理论和专业应用相脱节的两层皮现象。在探索林学类专业物理教学结合专业问题上，找到一些新的方向，新的落脚点。

本书承蒙全国高等物理教育研究会理事长、中国物理学会主办的刊物《大学物理》前主编、北京师范大学物理系李平教授审稿，他在百忙中对书稿作了认真的审阅，提出了许多宝贵意见。在此，特向李老师表示衷心地感谢。对支持和关心过本书出版的西北农业大学付志东老师、东北林业大学王庭奎老师以及北京林业大学基础部和物理教研室的老师们，一并致以谢忱。

限于水平，书中有缺点、错误和疏漏之处，恳请使用本书的老师和同学们批评指正。

编者

1994年7月

主 编：王长涵（北京林业大学）
副主编：郝金行（东北林业大学） 阎新喜（西北林学院）
编 者：王 昂（内蒙古林学院） 沈繁宜（北京林业大学）
赵 铎（西南林学院） 张社奇（西北林学院）
高宝山（河北林学院） 常立德（吉林林学院）
谢健夫（福建林学院） 蔡文匡（西南林学院）
(从副主编起，排名以姓氏笔画为序)。

目 录

绪论	1
✓第一章 流体力学基础	3
第一节 理想流体的稳恒流动	3
第二节 伯努利方程及其应用	5
第三节 粘滞流体的运动规律	9
第四节 生物流体力学简介	11
✓第二章 气体分子运动的统计规律	15
第一节 气体动理论的基本概念	15
第二节 理想气体的宏观描述	17
第三节 理想气体的压强和温度	18
第四节 能量均分原理 理想气体的内能	23
第五节 气体分子速率和能量的统计分布律	26
第六节 分子的平均碰撞次数和平均自由程	30
第七节 气体内的输运过程	32
第八节 范德瓦耳斯方程	36
✓第三章 生物热力学基础	41
第一节 热力学第一定律	41
第二节 热力学第一定律对于理想气体的应用	45
第三节 循环过程 卡诺循环	51
第四节 热力学第二定律	56
第五节 熵 熵增加原理	59
第六节 热力学第二定律的统计意义	65
第七节 热力学函数	68
第八节 生物系统热力学简介	75
✓第四章 液体中的分子理论	81
第一节 液体的表面张力	81
第二节 弯曲液面的附加压强	84
第三节 毛细现象	87
第四节 饱和蒸汽压	91
第五节 渗透现象	94
第五章 静电场 生物电现象	99
第一节 电场强度及其计算	99
第二节 高斯定理及其应用	103
第三节 电场力的功 电势	108
第四节 等势面 场强与电势的关系	112
第五节 电介质的极化 电介质中的场强	115

第六节	电场的能量	121
第七节	生物电现象 能斯脱方程	124
第六章	电流与磁场 生物磁现象	133
第一节	真空中的磁场 磁感应强度 磁通量	133
第二节	毕奥—萨伐尔—拉普拉斯定律及其应用	135
第三节	安培环路定律及其应用	137
第四节	磁场对运动电荷的作用 洛仑兹力	140
第五节	磁场对载流导线的作用	144
第六节	磁场中的磁介质 磁介质中的磁场	147
第七节	电磁感应	149
第八节	自感 互感	155
第九节	磁场的能量	159
第十节	生物磁学简介	160
第七章	机械振动和机械波	168
第一节	简谐振动	168
第二节	简谐振动的合成	173
第三节	机械波的产生与传播	177
第四节	简谐波方程	179
第五节	波的衍射和干涉	184
第六节	超声波	188
第八章	物理光学	191
第一节	相干光 双光干涉实验	191
第二节	薄膜干涉	194
第三节	惠更斯—菲涅耳原理 单缝衍射	198
第四节	圆孔衍射 助视仪器的分辨本领	201
第五节	光栅衍射 X射线衍射	205
第六节	光的偏振	209
第七节	光的双折射现象	213
第八节	光的吸收 色散和散射	218
第九节	旋光现象和圆二色	223
第九章	辐度学与光度学	230
第一节	辐通量 光通量	230
第二节	光度学及辐度学中的基本物理量	233
第三节	太阳与人工光源及其生理效应简介	239
第四节	光能的测量	241
第十章	量子理论及光谱	246
第一节	热辐射 普朗克的量子假设	246
第二节	光的量子性	250
第三节	物质波 实物粒子的波粒二象性	253
第四节	氢原子光谱的实验规律	257
第五节	原子的核型结构 玻尔的氢原子理论	259
第六节	量子力学大意	261

第七节	量子化条件：四个量子数	265
第八节	分子光谱	267
第九节	光谱及其应用	270
第十节	荧光 磷光	273
第十一节	激光	274
第十一章	放射性同位素及其在林业上的应用	280
第一节	原子核特征和同位素	280
第二节	放射性及其衰变规律	282
第三节	放射线与物质的相互作用	286
第四节	放射性同位素在生物学和林业上的应用	289
习题答案	298

绪 论

物理学是一门重要的基础学科。它的研究对象是物质运动最基本、最普遍的运动形式，包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内的运动等等。这些运动形式普遍地存在于其他高级的、复杂的运动形式（如化学的、生物的运动形式）之中。所以物理学的规律具有极大的普遍性，被认为是除数学之外的一切自然科学的基础，也是当代科学技术的重要支柱。

物理学与生产实践有着密切的关系。物理学的理论来自于实践，是人类对于自然界规律认识的总结，是长期科学实验的结果。反过来，它又对生产实践、科学技术的发展起指导和推动作用。

回顾物理学的发展，它已经历了三次重大的突破。17~18世纪，牛顿力学和热力学的建立，引起了第一次工业革命，尤其是蒸汽机的使用，极大地改变了工业生产的面貌。19世纪法拉第—麦克斯韦电磁理论的建立，预言了电磁波的传播过程，并说明了光的电磁本性，引起了工业电器化，使人类进入了应用电能的时代，这就是第二次工业革命。20世纪以来，由于相对论和量子力学的建立，人们对原子和原子核内部的认识日益深化，实现了原子能和人工放射性同位素的应用，进入了原子能、微电子及计算机、人工智能、空间技术等新产业时代。物理学技术已成为当今基础学科中发展最快、影响最深的一门学科。

物理学的成就对包括林学学科在内的生物科学的影响也不例外。生物学研究的是生命过程的运动形式，是自然界中最高级，最复杂的运动形式，它必然地包含了物理学中最基本、最普遍的运动形式。因此物理学的理论和技术成就也就成为生物科学的重要基础理论和研究手段之一。

物理学与生物科学的关系源远流长。但长期以来，生物学的发展是缓慢的。直至16世纪末发明了原始复式显微镜及17世纪英国科学家虎克对其做了改进后，人类才第一次突破了肉眼的限制，用光学显微镜看到了细胞的结构。随着光学显微镜的不断改进，人们对细胞的研究也日趋深入和完善，逐渐形成了近代的细胞学、组织学、生理学等，从而使生物学的研究从形态学的描述中产生了一次飞跃。随着20世纪电子显微镜的问世和不断改进，使电镜所做的观察，已达到超微结构的水平。

19世纪，生理学家已开始运用物理学的理论、概念、方法和手段研究生物科学。生物学和物理学相互渗透的结果，产生了一门崭新的学科——生物物理学。它运用物理学的理论，从宏观到微观，从理论到实验，对生物体本身的物理学特性和规律及外界物理因素对生物体的作用，进行了广泛的探讨。

20世纪是生物学丰收的世纪。新的物理观点和一系列物理新技术，如电镜技术、x射线衍射技术、电子计算机技术、波谱技术、核磁共振技术、激光技术等，被介绍到生物学领域中来，对细胞的超微结构、生物大分子的空间构象和功能、细胞生长过程、光合作用的机理和过程、以及遗传工程、生物技术等的研究提供了有力的手段。尤其是许多受过严格训练的物理学家步入生物学领域，对近代生物学的发展起了重大的推动作用，其中包括著名的物

理学家、量子论的先驱玻尔，量子力学的奠基人薛定谔等。薛定谔指出：生物学不论在实验方面还是在理论方面的深入研究，都有待于物理学的发展。生物学家沃森和物理学家克里克成功的合作，发现了脱氧核糖核酸(DNA)分子的空间双螺旋结构，被认为是20世纪生物学最伟大的成就之一，从而获得了诺贝尔奖。他们的合作也被誉为当今不同学科间合作的典范。

在包括生物学、物理学、化学等科学家们的密切合作和共同努力下，目前生物学研究已从宏观的、现象的、定性的描述，进入了微观的、本质的、定量的初步探讨，跃入了真正科学的行列。生物学的研究已深入到了分子、量子的层次，产生了一系列新的边缘学科，如生物热力学、生物电学、生物磁学、分子生物学、分子遗传学、以及量子生物学等。这些学科把生物学、物理学、化学等结合起来，并向更加深入和更高层次方向发展。科学家们预言，21世纪将是生命科学和生物技术的世纪。

物理学基础理论也是林业科学研究，林学各学科重要的基础理论之一。例如，在气象学、土壤学、植物生理学、遗传育种学、林业遥感、森林生态学等众多的学科中，分别涉及到物理学中的力学、流体力学、分子物理学、热力学、光度学、波谱学、色度学等基础理论。如绿色植物最重要的生理过程——光合作用，它是人类赖以生存的氧气、食物和能源的主要来源，也是自然界中氧气和二氧化碳浓度维持平衡的主要途径。研究光合作用的全过程及其作用机理，提高光合作用产率，不仅有重大的实际意义，还有重要的理论意义，因为它能对生命起源、生物进化等重大问题提供重要的理论依据。要阐明光合作用的理论，它涉及到光能的吸收、转换和利用，涉及生物力能学、生物热力学等物理理论和知识。又如，用于阐述植物体内水分及其他各种体液的代谢机理、代谢作用的种种理论，如压力流理论、导管输运理论、电渗透理论、胞质流学说等，均涉及物理学中的经典力学、流体力学、输运过程理论、热力学等。目前两学科间的渗透结合的结果，已产生了一些两学科间广义的边缘学科，如土壤物理学、木材物理学、风沙物理学、林业遥感、森林生态物理等。

物理学的研究方法、研究手段，尤其是近代物理学新技术，在林业科学、林木生产、森林资源调查和利用、病虫害防治、生态环境的改善以及森林防火等林业科技中都得到了广泛的应用。物理学与林业生产的关系十分密切，例如，林木及其他绿色植物生长的外界环境中包含有诸多的物理因素，如光照、水分、温度、湿度、重力等，它们对植物的生长、发育影响很大。正确测定、运用、控制和改造这些因素，都需要用到物理学的原理、方法和手段。在光合作用的研究中，需要高时间分辨率的激光快速光谱测定技术，用以跟踪研究植物吸收光能后在毫微秒、微微秒量级的变化过程中的吸收光谱、荧光光谱、散射光谱等，而且还需要辅以电子自旋共振、核磁共振、圆二色和旋光色散、x射线衍射、电镜技术、计算机技术等其他物理手段。尤其是核磁共振、圆二色等，对于活体组织及溶液中生物大分子组成的研究，较之用x射线衍射更为优越。波谱技术、红外技术、多波段遥感技术、激光技术等，在林业资源调查、环境污染监测、森林病虫害防治、森林防火中得到应用。放射性同位素及各种辐射的应用推动了50年代代谢作用的研究及促进遗传育种工作的发展，对提高林业生产起了一定的作用。

综上所述，已见物理学对发展林业科学和林业生产的重要性，而且将越来越重要。未来的林业科学和林业生产工作者，更需具备深厚扎实的物理学基础理论，掌握必要的先进技术，学会运用物理学的研究方法分析问题、解决问题，以满足林业科技工作的需要，为实现林业科学和生产的现代化作出贡献。

第一章 流体力学基础

流体是液体和气体的总称。流体力学是在牛顿定律基础上研究流体宏观运动规律的分支学科，它不涉及流体的物质结构，而是把流体看成是由无数连续分布的流体质点所组成。流体质点指的不是个别流体分子，而是大量分子的集合。宏观地看，流体质点应该足够小，小到仅是一个几何点，只有这样，我们才能确定流体中某点的某个物理量的大小；微观地看，流体质点又应该足够大，大到它包含非常多的分子数，以使描述流体质点的宏观物理量有确定的值，而不受分子微观运动的影响。

流体力学广泛地应用于航空、航海、气象、水利工程以及生物学等各个领域，形成很多新的分支学科，如水力学、生物流体力学等。本章将着重讲述理想流体稳恒流动的基本规律，同时，简要介绍粘滞流体的基本规律以及生物流体力学概况。

第一节 理想流体的稳恒流动

理想流体 在我们观察渠道中的水流时，可以看到越靠近岸边的水流动得越慢，这是流体粘性（或称粘滞性）的表现。当流体各部分之间有相对运动时，就会产生摩擦力来阻碍这种相对运动，快流层将“带动”慢流层，慢流层将“阻滞”快流层，这叫做流体的内摩擦现象或粘滞现象，这种相互作用力称为内摩擦力（或粘滞力）。流体的粘性是流体内部存在分子热运动和分子之间存在相互作用力的结果。实际的流体都是粘性流体。

为了简化问题，人们引入了“理想流体”的概念。所谓理想流体，是指既不可压缩又没有粘滞性的流体，这是理想化的流体模型。其特点是，流体内部任一点沿流动方向的切应力始终为零（这里的切应力即粘滞力），而且流体的总体积不变。在许多实际问题中，如果液体或气体的流速不大、粘性较小、体积变化不大时，按理想流体来考虑，也能得到对流体流动情况足够精确的描述。

稳恒流动 按各空间点的物理量是否随时间发生变化，流体的流动可以分为稳恒流动（也称定常流动）和非稳恒流动。

如果在流动区域的各空间点上的速度、压强等物理量随时间发生变化，则这种流动叫做非稳恒流动，实际的流动大都是非稳恒流动。非稳恒流动的情况十分复杂，许多问题至今尚无圆满的解答。

但在有些情况下，只要在所考察的范围内，流动随时间变化不明显，就可以认为流动是不随时间发生变化的，这种流动叫做稳恒流动。在稳恒流动过程中，尽管流体中各点的流速、压强并不相同，但流体中各空间点的所有物理量都不随时间发生变化。例如：流速不大的管道中水的运动，流速不大且涨不落的河水的运动，在一段不太长的时间内都可以看成是稳恒流动。

流线和流管 为了形象地描述流体每一特定瞬时的流动，引入流线的概念。定义流线是

这样的线，在给定瞬时，线上每一点的切线方向和该点的流体质点的速度方向一致。流线与电力线、磁力线类似，是一种假想的曲线，见图 1-1(a)和(b)。

在稳恒流动中，流体中各空间点速度的大小和方向都不随时间发生变化，因而流线也不随时间变化。在这种情况下，开始位于某一流线上的流体质点，由于其速度方向始终与该流线的切线方向一致，因而将一直沿着该流线运动，即流线与流体质点的运动轨迹相重合。图 1-1(c) 为流体通过圆柱体和机翼时的流线。

从图 1-1 可以看出，流体中可以作无数条流线。现在引入流管的概念。在稳恒流动中，由一束流线围成的管状区域叫流管，如图 1-2 所示。由于流管的侧壁由流线构成，流线又不相交，所以管内流体不会从管壁流出，管外流体也不会从管壁流入，就好像在一个固定管道中流动一样。将流体分成若干个流管后，只要知道了每一个流管中流体的运动规律，就知道了整个流体的运动规律。

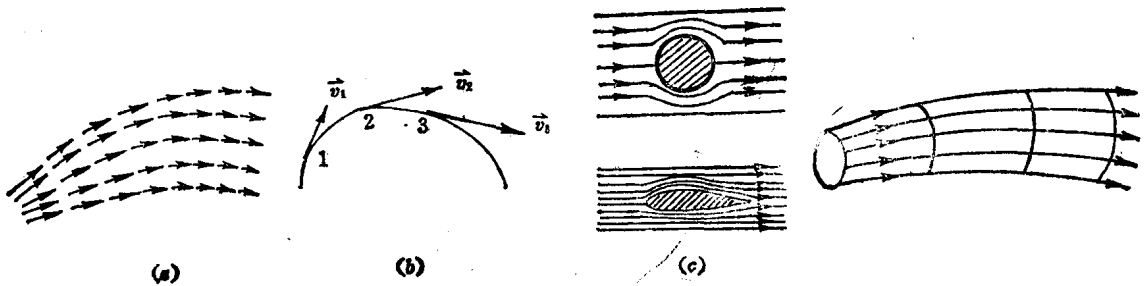


图 1-1 流线

图 1-2 流管

连续性原理 假设流体做稳恒流动，我们任取一段细流管进行观察，这一段细流管的两端面的截面积分别为 S_1 和 S_2 ，如图 1-3 所示。经过时间 Δt ，流入这一段细流管中的流体质量为 $\Delta m_1 = \rho_1 S_1 v_1 \Delta t$ ，流出的质量为 $\Delta m_2 = \rho_2 S_2 v_2 \Delta t$ 。根据稳恒流动和流管的性质，这一段细流管内的流体质量不会增加或减少，流体质点也不会从管壁流进或流出，所以有

$$\Delta m_2 - \Delta m_1 = 0, \text{ 即}$$

$$\rho_2 S_2 v_2 = \rho_1 S_1 v_1 \quad \text{或} \quad \rho S v = \text{常量} \quad (1-1)$$

图 1-3 推导连续性原理

这就是稳恒流动的连续性原理。它表示：在稳恒

流动中，同一细流管任一截面处的流体密度、流速和截面面积的乘积是一个常数。式(1-1)也叫质量流量守恒定律。

如果流体是不可压缩的，即 ρ 为常量，则上式简化为

$$S v = \text{常量} \quad (1-2)$$

式(1-2)表明，对不可压缩流体的稳恒流动，同一细流管中任一截面处的流速和截面面积的乘积是一个常量。式(1-2)也叫体积流量守恒定律。可以看出，流速与流管的截面面积成反比，即截面大的地方流速小，截面小的地方流速大。这个结论我们在日常生活中是熟悉的。例如，河道宽处水流慢，河道窄处水流急，以及俗话说的“巷小风大”等，就是这个道理。它们在航空、航海、气象学等方面均有重要的应用。

上面两式都是对细流管而言，统称为流体的连续性原理。如果不是细流管，则 v 或 ρv 应理解为在截面 S 上的平均值。式 (1-2) 对实际管道中不可压缩流体的非稳恒流动也适用。

第二节 伯努利方程及其应用

伯努利方程的推导 理想流体做稳恒流动时，压强和流速之间存在一条重要的基本规律——伯努利方程，它是流体动力学定律，应用动能定理导出伯努利方程。

如图 1-4 所示 S_1 和 S_2 表示从某一细流管上任意截取的两个截面面积，两处的流速分别是 v_1 和 v_2 ，两处流管的高度分别为 h_1 和 h_2 。我们取 t 时刻位于 S_1 和 S_2 之间的流体作为研究对象，并设在 Δt 时间内这部分流体移动到了截面 S'_1 和 S'_2 之间。由于理想流体是不可压缩的， S_1 和 S'_1 之间流体的质量必定等于 S_2 和 S'_2 之间的流体质量，用 Δm 表示。

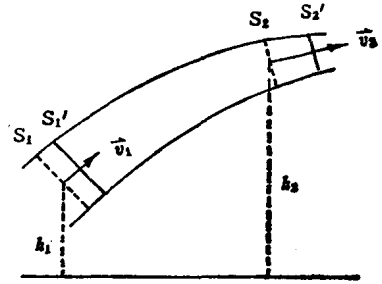


图 1-4 推导伯努利方程

先分析和计算经过 Δt 时间这段流体动能的变化。

由于流体作稳恒流动，在 S'_1 和 S_2 之间流体的动能不会改变，所以动能的变化应该等于 S_2 、 S'_2 之间流体的动能与 S_1 、 S_1 之间的动能之差，即

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \Delta m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m \cdot v_1^2$$

下面分析并计算在 Δt 时间内，外力对这段流体所作的功。作用在这段流体上的力有重力和周围流体对它的作用力。由于理想流体是没有粘性的，流管外的流体对这段流体的压力必垂直于流管表面，因而这种压力不做功，只有流管内部流体作用在这段流体前后的压力才做功。设在 S_1 和 S_2 处的压强分别为 p_1 和 p_2 。在 Δt 时间内，作用在 S_1 上的压力 $f_1 = p_1 S_1$ ，作正功 $W_1 = f_1 v_1 \Delta t$ ，作用在 S_2 上的压力 $f_2 = p_2 S_2$ ，作负功 $W_2 = -f_2 v_2 \Delta t$ 。重力的功可以这样来计算：我们把 S_2 、 S'_2 之间的流体看成是用重力从 S_1 、 S'_1 之间移来的，据此，重力的功为负功 $W_3 = -\Delta m g (h_2 - h_1)$ 。根据以上分析，在 Δt 时间内，外力对这段流体的功为 $W = W_1 + W_2 + W_3$ ，即

$$W = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t - \Delta m g (h_2 - h_1)$$

由连续性原理和体积流量的定义知

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 = \frac{\Delta m}{\rho \Delta t}$$

式中， ρ 为流体密度。综合上两式，有

$$W = (p_1 - p_2) \frac{\Delta m}{\rho} - \Delta m g (h_2 - h_1)$$

根据动能定理，外力所做的功等于动能增量，即

$$W = \Delta E_k = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2$$

由此得

$$p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1$$

或

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{常量} \quad (1-3)$$

式(1-3)叫做伯努利方程。方程中的 p 、 v 、 h ，都是对细流管的同一截面而言，式中的常量对不同的细流管有不同的值。

伯努利方程的意义 式(1-3)中的 $\frac{1}{2} \rho v^2$ 是流体单位体积所具有的动能， $\rho g h$ 是流体单

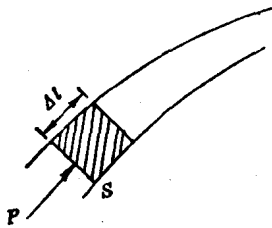


图 1-5 p 是流体单位体积的压力能

位体积所具有的势能。 p 的意义说明如下：从图(1-5)可以看出，在同一细流管中，当体积为 $S \Delta l$ 的流体通过截面 S 时，压力所做的功为 $\Delta W = p S \Delta l$ 。因此，压力使单位体积流体通过 S 所做的功为

$$\frac{\Delta W}{S \Delta l} = \frac{p S \Delta l}{S \Delta l} = p$$

这表示， p 是单位体积流体通过细流管截面时，压力所完成的功。据此，习惯上把式(1-3)中的 p 叫作流体单位体积的压力能。综上所述，伯努利方程的物理意义是，对于细流管中理想流体的稳恒流动，流体单位体积的动能、势能和压力能三者之和保持不变。可见，伯努利方程是能量守恒定律在流体力学中的数学表达式。

把式(1-3)中各项都除以 ρg ，可以得到伯努利方程的另一表示式

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h = \text{常量}$$

此式在水力学中广泛应用。如果细流管是水平的，那么，在流动中流体势能不发生变化，伯努利方程简化为

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量}$$

上式表示水平放置的管子中流速大处压强小，流速小处压强大。

伯努利方程的应用 伯努利方程应用于流体力学许多问题中，如流速和流量的计算。下面简述其原理。

1. 小孔流速 设在液面下深度为 h 的地方，液体从小孔流出，如图 1-6 所示。由于容器的截面比小孔的截面大的多，所以在不太长的时间内，液面几乎不下降，据此可以认为液面上 A 点的流速为零。另外，由于 A 点和小孔处 B 点都与大气相接触，因此， $p_A = p_B = p_0$ 。

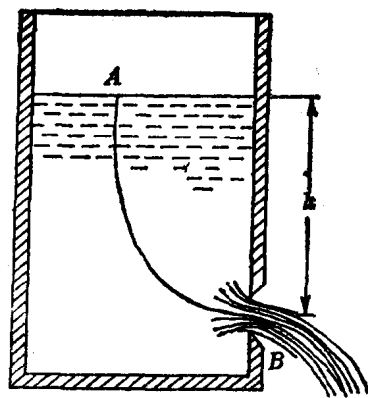


图 1-6 小孔流速

(p_0 为大气压强)。选 B 点为势能零点，对 A、B 两点应用伯努利方程，有

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_0 + \rho gh$$

式中 v 为 B 点 (即小孔) 的流速。由此得

$$v = \sqrt{2gh}$$

这表示, 液体质点从小孔中流出的速度与它从 h 高处自由落下的速度相同。

2. 流量计 流量计又称汾丘里管, 是用来测量管道中液体体积流量的。它是一段中间细两头粗的管子, 水平安装在待测管道中, 如图 1-7 所示。应用伯努利方程有

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

式中, v_1 和 v_2 分别表示粗部 S_1 和细部 S_2 处的流速, p_1 、 p_2 分别为 S_1 、 S_2 处的压强。因 $v_2 > v_1$, 故 $p_1 > p_2$ 。压强差 $p_1 - p_2 = \rho gH$ 。又根据连续性原理, 有 $v_1 S_1 = v_2 S_2$ 。综合以上各式, 得

$$\rho gH = \frac{1}{2}\rho \left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right) v_1^2$$

因此体积流量 Q (即单位时间内流过的流体体积, 亦称流量率), 可写成

$$Q = v_1 S_1 = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2gH}{S_1^2 - S_2^2}}$$

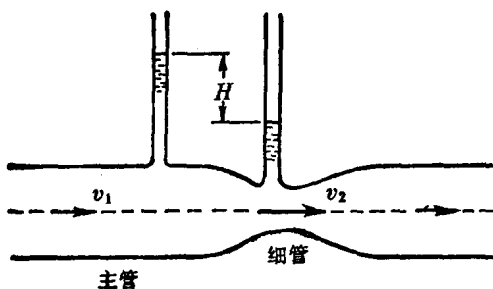


图 1-7 流量计原理

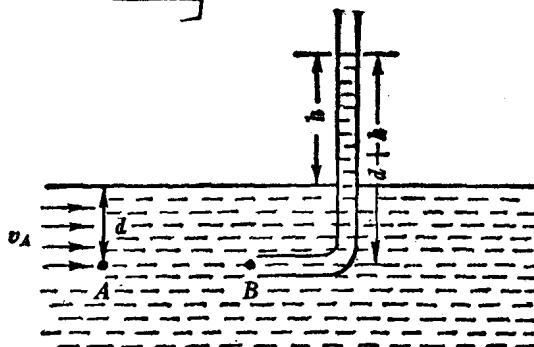


图 1-8 测流速原理

在工程上实际应用时, 上式需修正为

$$Q = C_v S_1 S_2 \sqrt{\frac{2gH}{S_1^2 - S_2^2}}$$

这里的 C_v 是小于 1 的系数, 叫做速度系数, 其数值视流量计的形状和流速的快慢等因素而定, 可通过实验测得。

3. 流速的测量 比多管是测量流速用的一种比较古老的仪器。图 1-8 表示利用比多管测量水流速度时水在管中上升到一定高度的情形。设 A、B 为在同一水平线上的两点, A 点的流速为 v_a , 该点在水面下的深度为 d , 故该处的压强 $p_A = \rho g d$; B 点在管口之前, 因水流被管口内的水挡住, 水流绕着管口周围流去, 故管口前的流速 $v_B = 0$, 而管口处的压强 p_B 则等于 $\rho g(d+h)$ 。根据伯努利方程 (见式 1-3) 有

$$p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = p_B$$

所以

$$v_A = \sqrt{\frac{2(p_B - p_A)}{\rho}} = \sqrt{2gh}$$

在实际应用时，上式须修正为

$$v_A = C \sqrt{2gh}$$

其中， C 为比多管的修正系数，由实验来测定。

用比多管测流速，必须与流体接触，或多或少总是要扰乱流体原来的流动情况，这是接触式仪器不可避免的缺点。利用激光技术设计的激光流速仪，在测量时不会影响流体流动状况，因而测量精确度高，已成为现代研究流体动力学的重要工具。

例 1-1 地面上水管中的水压为 $p_1 = 4 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，用内直径为 2.0cm 的水管引入建筑物内，接着又用内直径为 1.0cm 的管子将水引到高为 5.0m 的楼上。楼上放水时，楼下管内流速 $v_1 = 4.0 \text{ m/s}$ ，求楼上管口处水的流速 v_2 和压强 p_2 。

解：根据连续性原理求流速，即

$$v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1 = \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1 = \frac{0.02^2}{0.01^2} \times 4.0 = 16 \text{ m/s}$$

利用上面式子计算数据，由伯努利方程求压强，即

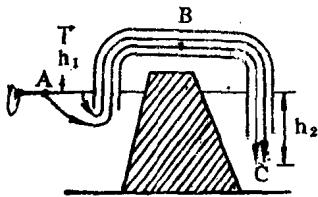


图 1-9

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) + \rho g (h_1 - h_2) \\ &= 4 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 10^3 \times (4^2 - 16^2) + 10^3 \times 9.8 \times (0 - 5) \\ &= 2.3 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

例 1-2 图 1-9 是利用虹吸管从水库引水的示意图。已知虹吸管粗细均匀，其最高点 B 比水库水面高出 $h_1 = 3.0 \text{ m}$ ，管口 C 又比水库水面低 $h_2 = 5.0 \text{ m}$ 。求虹吸管内的流速及 B 点处的压强。

解：取虹吸管为细流管。A 点流速为零，压强为 p_0 ；出口处 C 的流速为 v ，压强也为 p_0 ；且设 h_A 、 h_B 、 h_C 分别为 A、B、C 三点的高度 ($h_A = 0$ ， $h_B = h_1$ ， $h_C = h_2$)。对此流管应用伯努利方程，得

$$\rho g h_A + p_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h_C + p_0$$

即

$$v = \sqrt{2g(h_A - h_C)} = \sqrt{2gh_2} = 9.9 \text{ m/s}$$

因虹吸管粗细均匀，根据连续性原理，这个流速就是虹吸管中的流速。

设 B 点处的压强为 p_B ，对 B、C 两点应用伯努利方程，得

$$\rho g h_B + p_B = \rho g h_C + p_0$$

所以

$$\begin{aligned} p_B &= p_0 + \rho g (h_C - h_B) = p_0 - \rho g (h_1 + h_2) \\ &= 1.013 \times 10^5 - 10^3 \times 9.8 \times (3.0 + 5.0) \\ &= 2.3 \times 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

可见，虹吸管最高处的压强比大气压小。正是由于这一原因，水库里的水才能上升到B处。

第三节 粘滞流体的运动规律

以上讨论的是理想流体，对实际流体而言，粘滞性是不能忽略的，本节就简单的粘性流体流动规律作一介绍。

流体的粘滞性 如图 1-10 所示装置，在两块水平放置的平玻璃板之间放一层粘性流体（如甘油），下板固定，现对上板施加一恒定水平方向作用力 F 而使之运动。实验发现，上板的速度增加到某一数值 v 后就不再增加了，且以这个速率匀速前进。粘附在上面玻璃板上的一层液体随着上板运动（流速也为 v ），粘附在下玻璃板上的一层液体则静止不动。由上而下的各层液体，由于层与层之间内摩擦力的作用，各层分别以由 v 到 0 的不同速率运动着，各流层之间只作相对滑动，彼此不相混合，这种流动状态叫做层流。流体能够产生这种内摩擦作用的性质就是粘滞性。

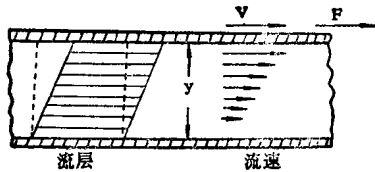


图 1-10 层流

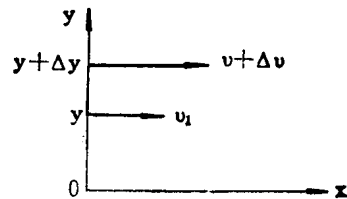


图 1-11 流速梯度图

内摩擦定律 如图 1-11 所示，流体在 y 方向分层做沿正 x 轴方向定常流动，层面与 y 轴正交，当流层（ y ）不同时有不同的速度，设 y 层流速为 v ， $y+\Delta y$ 的流速为 $v+\Delta v$ ，则

$\frac{\Delta v}{\Delta y}$ 表示沿 y 轴的速率变化率。若令 $\Delta y \rightarrow 0$ 求 $\frac{dv}{dy}$ 的极限称为沿 y 方向的流速梯度，

$\frac{dv}{dy}$ 仍为 y 的函数。

牛顿在大量实验基础上于 1686 年总结出内摩擦定律，即：内摩擦力 F 与它分布的面积 S 成正比，与该处的流速梯度成正比。其表示式为

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S \quad (1-4)$$

式中， η 称为流体的粘滞系数（或粘度）。粘滞系数大的流体粘滞性大。实验表明：不同流体的粘滞性不同，同一流体的粘滞性随温度的变化而变化。表 1-1 和表 1-2 分别列出了一些常见流体的粘滞系数和水在不同温度下粘滞系数的值。

牛顿内摩擦定律适用于大多数气体、水和许多润滑油类以及低碳氢化物等，把这类流体