



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

物 理 学

周静娴 主编

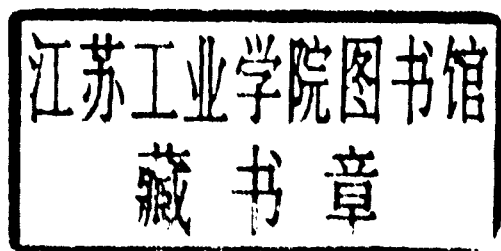
中 国 农 业 出 版 社

64-43
274

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

物 理 学

周静娴 主编



中 国 农 业 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

物理学 / 周静娴主编. —北京: 中国农业出版社,
2002.7

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-109-07518-4

I. 物... II. 周... III. 物理学-高等学校-教材

IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 040213 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)
(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥
责任编辑 李耀辉

北京市密云县印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/16 印张: 14.5

字数: 343 千字

定价: 21.40 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

前 言

本教材被教育部批准列入高等教育“面向 21 世纪课程教材”。

本教材第一稿于 1998 年底完成，作为教材已被南京农业大学及安徽农业大学的本、专科生使用了 3 年多，在此基础上，经过进一步充实与提高，并作了适当的取舍修订而成。

本教材以高中物理为起点，把重点放在基本概念、基本原理和基本方法的阐述上，降低了理论要求。尽可能广泛地介绍实践领域中的各种应用，以丰富读者的基础物理知识。

为了克服物理学内容多而农业院校教学时数少的矛盾，本教材尽可能避免与中学内容重复，必要时只作简要叙述，以保持内容的连贯性。本教材不求物理学科体系的完整，而紧密结合农科类专业特点，力求构成有利于教与学的教学内容体系。全书共十一章，考虑到教学的实际需要，对物理学经典内容作了必要的取舍，突出了热力学、电磁学、光学等内容，并对一些物理学新技术作适当介绍，以拓宽学生的视野。考虑到对农科类学生一般不设电工学课程，故增加了直流电、交流电等章节。每章后有适量习题，以便于读者进行自我检查，并巩固所学的知识。

参加本教材编写的有周静娴（南京农业大学，第二、七、十一章）、章国顺（安徽农业大学，第八、十章）、杨宏伟（南京农业大学，第四、五章）、李广新（安徽农业大学，第六章）、郭守月（安徽农业大学，第三章）、李萍（江西农业大学，第一、九章）。全书由主编周静娴修改、通读、定稿。感谢南京农业大学、安徽农业大学、江西农业大学教务处的有关同志，以及南京农业大学的唐玄之教授，在本书的编写过程中，给予很大的支持。感谢第一稿的参编人员，他们的辛勤劳动是我们的基础。本教材引用了一些著作者的插图，在此一并致谢。

由于我们的学识与经验有限，错误和不当之处在所难免，欢迎使用本书的师生指正。

编 者

2002 年 1 月 13 日

主 编 周静娴 (南京农业大学)
副主编 章国顺 (安徽农业大学)
参 编 杨宏伟 (南京农业大学)
李广新 (安徽农业大学)
郭守月 (安徽农业大学)
李 萍 (江西农业大学)

内 容 简 介

本教材为高等农业院校“物理学”课程教科书，被教育部批准列入高等教育“面向 21 世纪课程教材”，内容包括流体的运动、液体的表面性质、热力学基础、静电场、电动势及跨膜电势差、稳定磁场、交流电、光的波动性、光谱学简介、辐射度学与光度学及现代物理选读等十一章。每章后都有一定数量的习题，以帮助读者检查并巩固所学的知识。

本教材适用于土壤和资环、食品科学、生命科学、农药、植保、畜牧兽医等各专业的本、专科学生。也可作为农、林科技人员进修用书。

目 录

前言

第一章 流体的运动	1
第一节 理想流体的稳定流动	1
第二节 伯努利方程及其应用	3
第三节 粘滞流体的流动	7
第四节 泊肃叶公式及其应用	10
第五节 斯托克斯定律及其应用	11
习题	13
第二章 液体的表面现象	16
第一节 液体的表面张力	16
第二节 弯曲液面的附加压强	21
第三节 毛细现象	23
习题	28
第三章 热力学	31
第一节 基本概念	31
第二节 热力学第一定律	33
第三节 热力学第一定律对理想气体的应用	37
第四节 循环过程 卡诺循环	41
第五节 热力学第二定律	44
第六节 熵 熵增加的原理	47
第七节 生物系统的热力学简介	51
习题	52
第四章 静电场	54
第一节 电场强度	54
第二节 高斯定理	58
第三节 静电场环路定理 电势	63
第四节 电介质中的电场	68

第五节 静电场的生物效应	71
习题	75
第五章 直流电	78
第一节 电路的基本物理量	78
第二节 基尔霍夫定律	80
第三节 电路中各点电势的计算	83
第四节 基尔霍夫定律的应用	84
第五节 温差电现象	87
第六节 跨膜电势差	90
习题	92
第六章 稳定磁场	95
第一节 磁感应强度	95
第二节 恒定磁场的基本性质	99
第三节 霍尔效应	101
第四节 生物的磁效应及其应用	103
习题	107
第七章 正弦交流电路	109
第一节 正弦交流量的基本特征	109
第二节 正弦交流电矢量图解法	112
第三节 正弦量的复数表示	113
第四节 电阻、电感、电容单一参数的正弦交流电路	116
第五节 电阻、电感、电容串联的正弦交流电路	119
第六节 电阻、电感、电容并联的正弦交流电路	121
第七节 交流电路的功率	123
第八节 功率因素	127
第九节 电路中的谐振	128
习题	132
第八章 光的波动性	134
第一节 振动与波动	134
第二节 波的干涉	142
第三节 光的干涉	144
第四节 光的衍射	150
第五节 光的偏振	158

第六节 显微镜	163
习题	167
第九章 光谱学简介	170
第一节 光的量子性	170
第二节 德布罗意波	173
第三节 氢原子	174
第四节 分子光谱与分子能级	177
第五节 荧光和磷光	180
习题	181
第十章 辐射度学和光度学基础	182
第一节 辐射度学的基本概念	182
第二节 光度学基础	185
第三节 光的测量	190
习题	193
第十一章 当代物理前沿选读	195
第一节 激光技术	195
第二节 纳米材料简介	202
第三节 超导及其应用	206
习题	211
附录一 基本物理常数	213
附录二 国际单位制 (SI) 单位	213
附录三 矢量	215
附录四 液晶知识	217
附录五 泊肃叶公式的推导	219
主要参考文献	221

第一章 流体的运动

液体和气体都具有流动性,统称为流体。研究流体的运动规律以及流体与其他物体之间相互作用的力学称为流体动力学。流体动力学在生物科学和农牧业生产中具有广泛的应用。例如生物体液和氧分的输送,动物体内血液的循环,土壤中水分的运动,以及农田排灌、昆虫迁飞等的研究都要用到流体动力学知识。

本章以液体为对象,讨论流体运动的一些基本规律和主要运动特征:连续性原理、伯努利方程及液体的粘滞性,并介绍流体力学基本原理在生物学中的一些应用。

第一节 理想流体的稳定流动

一、理想流体模型的建立

实际流体在流动时,其内部有相对运动的相邻两部分之间存在类似两固体相对运动时存在的摩擦阻力,称为内摩擦力,流体的这种性质称为粘滞性。实际流体在外界压力作用下,其体积会发生变化,即具有可压缩性。由于实际流体具有粘滞性及可压缩性,因此实际流体的运动规律极为复杂。

液体的可压缩性一般说来是很小的,例如水在 10°C 时压强每增加 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1 个大气压),体积仅减少原体积的二万分之一。为了简化起见,我们通常在研究液体的运动时,将液体看成是不可压缩的。许多常见的液体(如水、酒精等)其粘滞性很小,通常可予以忽略。因此在流体动力学的研究中,为了使问题简化,我们引入一个理想模型——理想流体。所谓理想流体,就是绝对不可压缩且完全没有粘滞性的流体。理想流体事实上并不存在,但根据理想模型得出的结论,在一定条件下可以近似地说明实际流体的流动情况。

二、稳定流动、流线和流管

通常将流体看做是由大量流体质点所组成的连续介质,一般情况下在研究流体运动时,由于流体各部分可以有相对运动,因此各部分质点的流动速度可以互不相同。即流速是空间位置的函数。而每个质点的流速在流动过程中可随时间变化,即速度又是时间 t 的函数。如果流速只是空间位置的函数,而与时间无关,这种流动称为稳定流动,或称定常流动。如图 1-1 所示,若流体的流动状态为稳定流动,则流经 1、2、3 三点处流体质点的流速各不相同,分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 ,但任何时刻流经 1 点处的流体质点的速度总是 v_1 ,流经 2 点处速度为 v_2 ,流经 3 点处的速度是 v_3 ,即各点处的流速不随时间变化。稳定流动是流体的一种重要流动形式,本章只讨论液体的稳定流动。

为了形象地描述流体的流动情况,我们引入流线概念。如图 1-1 所示,设想在流体中作一些

曲线,其上任一点的切线方向都与流体质点流经该点的速度方向一致,这样的曲线叫做流线。稳定流动时,流线不随时间变化,且与流体质点的运动轨迹重合。因为任何时刻,流场中任一给定处的流速只有一个,因此流线不会相交。

由流线围成的管状空间称为流管。由于流线不相交,所以流管内的流体质点不可能穿出流管,流管外的流体质点亦不会流入管内。我们在研究流体运动时,常将流体划分成许多细流管,分析每个流管中流体的运动规律,从而掌握流体整体的运动规律。

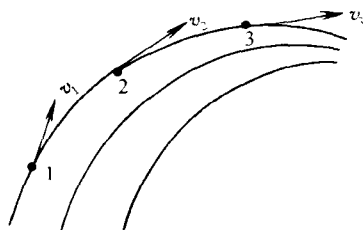


图 1-1 稳定流动、流线

三、连续性原理

在稳定流动的理想流体中任取一细流管,如图 1-2 所示,并任取两个与流管垂直的截面 ΔS_1 和 ΔS_2 ,由于流管很细,可以认为在同一截面上各处的流速都相同。设在 ΔS_1 和 ΔS_2 处的流速大小分别为 v_1 、 v_2 ,并设流体由左向右流动,在一较短时间 Δt 内,流过截面 ΔS_1 和 ΔS_2 的体积分别为 $\Delta S_1 v_1 \Delta t$ 、

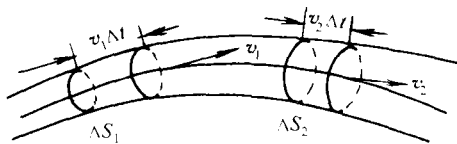


图 1-2 连续性方程推导

$\Delta S_2 v_2 \Delta t$ 。由于理想流体具有不可压缩性,又由于是稳定流动,不可能有任何流体质点穿入或穿出流管,因而在相同时间内流过两截面的流体体积应该相等,由此得:

$$\Delta S_1 v_1 \Delta t = \Delta S_2 v_2 \Delta t \quad (1-1)$$

即:

$$\Delta S_1 v_1 = \Delta S_2 v_2$$

因为 ΔS_1 、 ΔS_2 为流管中任意的两个截面,所以(1-1)式可以写成

$$\Delta S v = \text{恒量} \quad (1-2)$$

式(1-2)称为理想流体的连续性方程,也叫做连续性原理。式中 $\Delta S v$ 表示单位时间内流过任意截面 ΔS 的流体体积,称为体积流量,简称流量,用字母 Q_v 表示,单位为 m^3/s 。因而式(1-2)又可叫做流量方程,它表明:流体在同一细流管中作稳定流动时,通过任意截面 ΔS 的体积流量 Q_v 保持不变。由此可知,不可压缩的流体在流管中做稳定流动时流体的流速 v 与管的截面积 ΔS 成反比,即截面大处流速小,狭窄处流速大。消防龙头喷嘴出口处截面比水管处小得多,因而在出口处速度很大,能喷射到相当远的距离。

利用连续性原理可以解释动物体内血液循环的情况。血液从左心室射出后,经过动脉、毛细血管和静脉流回右心房。毛细血管管径虽然很细,但其分枝很多,总的截面积是主动脉截面积的数百倍,由于血液流动的连续性,因而主动脉血流速度亦为毛细血管血流速度的数百倍。如在静息状态下,人的主动脉血流速度可达 0.3 m/s ,而毛细血管中的血流速度仅为 10^{-3} m/s 。

连续性原理是针对一细流管的,用来解决整个管道或渠道的问题时,式中的 v 应取管道各点流速的平均值。连续性方程不仅适用于作稳定流动的理想流体,对有粘滞性的实际流体,只要流体

不可压缩并作稳定流动,方程依然适用。

例 1.1 有一条灌溉渠道,横截面是梯形,底宽 2 m,水面宽 4 m,水深 1 m。这条渠道再通过两条分渠道把水引到田间,分渠道的横截面也是梯形,底宽 1 m,水面宽 2 m,水深 0.5 m。如果水在两条分渠道内的流速都是 0.2 m/s,求水在总渠道中的流动速度。

解: 设总渠道的截面积为 S_1 , 分渠道的截面积为 S_2 。

$$S_1 = \frac{1}{2}(4 + 2) \times 1 = 3(\text{m}^2)$$

$$S_2 = \frac{1}{2}(2 + 1) \times 0.5 = 0.75(\text{m}^2)$$

因为有两条分渠道,所以根据连续性方程,可知: $S_1 v_1 = 2S_2 v_2$

所以
$$v_1 = 2 \frac{S_2}{S_1} v_2 = 2 \times \frac{0.75}{3} \times 0.2 = 0.1(\text{m/s})$$

第二节 伯努利方程及其应用

一、伯努利方程

伯努利方程是由瑞士物理学家伯努利(D. Bernoulli)提出来的,是理想流体作稳定流动时的基本方程,对于确定流体内部各处的压力和流速有很大的实际意义,在水利、造船、航空等部门有着广泛的应用。

如图 1-3 所示,在作稳定流动的理想流体中,任取一细流管,在 a_1 、 a_2 两处垂直于流管的截面积分别为 S_1 、 S_2 , 设流体由 a_1 向 a_2 流动,在 a_1 和 a_2 处的流速大小分别为 v_1 、 v_2 , 在很短的时间间隔 Δt 内, $a_1 a_2$ 这一小段流体移到了 $b_1 b_2$ 处。流动的结果,从效果上看相当于用 $a_2 b_2$ 流体取代了 $a_1 b_1$ 部分的流体。设流体在 $a_1 b_1$ 处的机械能为 ΔE_1

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1$$

在 $a_2 b_2$ 处的机械能为 ΔE_2

$$\Delta E_2 = \frac{1}{2} m v_2^2 + m g h_2$$

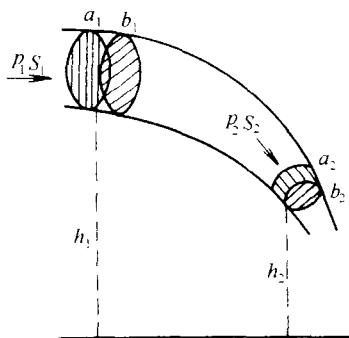


图 1-3 伯努利方程式的推导

则整段流体在 Δt 时间内机械能增量为 $\Delta E = \Delta E_2 - \Delta E_1$, 是外力对 $a_1 b_1$ 间的流体做功的结果。对于理想流体,由于无粘滞性,不会产生平行于流管侧壁的切应力,流管外的流体对这部分流体的压力必垂直于流管侧表面,因而不做功。做功的仅是作用于 a_1 、 a_2 两处端面的力,作用于 a_1 表面上的外力为 $p_1 S_1$, 此力作正功, a_1 处流体的位移为 $v_1 \Delta t$ 。作用于 a_2 表面上的外力为 $p_2 S_2$, 此力作负功,流体的位移为 $v_2 \Delta t$ 。在 Δt 时间内,外力对这段流管内流体所做的功为

$$W = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t$$

根据功能原理,外力所作的总功等于机械能的增量,故有 $W = \Delta E$ 即

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 - (\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1) = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t$$

根据连续性方程 $Sv = \text{恒量}$,故单位时间内流过任一截面的体积相等, $V = Svt$,则

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

整理上式,得

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1-3a)$$

由于式中 1、2 是同一流管内的任意两点,故可略去下标。对于同一流管的任一截面

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

式(1-3)称为伯努利方程,它表明:对于不可压缩的理想流体作稳定流动,在同一流管内的任一处,每单位体积流体的动能、势能以及该处压强之和是一恒量。

在工程应用中常将式(1-3)改写为

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h = \text{恒量} \quad (1-4)$$

称 $p/\rho g$ 为压力水头, $v^2/2g$ 为速度水头, h 为位置水头,三者之和为总水头,它们都具有长度的量纲。这时伯努利方程可表述为:理想流体稳定流动时,在同一流管的任一处,总水头是一常量。

对于水平流管因各处的高度不变,于是伯努利方程为

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{恒量} \quad (1-5)$$

此式表明,水平管道内流速大处压强小,流速小处压强大。这一原理有许多实际的应用。

例 1.2 水管里的水在压强 $p = 4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的作用下流入房间,水管的内直径为 2.0 cm,管内水的流速为 4 m/s。引入到 5 m 高处二楼楼浴室的水管,内直径为 1.0 cm。试求浴室内水的流速和压强(已知水的密度为 $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$)。

解:由连续性原理知 $S_1 v_1 = S_2 v_2$

所以

$$v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1 = \frac{\pi(\frac{d_1}{2})^2}{\pi(\frac{d_2}{2})^2} v_1$$

由伯努利方程

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

所以

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 - \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) - \rho g(h_2 - h_1) \\ &= 4 \times 10^5 - \frac{1}{2} \times 1.0 \times 10^3 \times (16^2 - 4^2) - 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 5 \end{aligned}$$

$$= 2.23 \times 10^5 (\text{Pa})$$

二、伯努利方程的应用

(一) 范丘里流量计

如图 1-4 所示为范丘里流量计,它是由一根中间细两头粗的主管,以及在粗管部分及狭窄部分各装一根竖直的细管组成,使用时将主管水平放置。

应用伯努利方程(1-5),有

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

由连续性原理,得 $v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2$,代入上式得

$$v_2 = S_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(S_1^2 - S_2^2)}}$$

压强差可由两竖管中液面的高度差算出, $p_1 - p_2 = \rho g H$ 故

$$v_2 = S_1 \sqrt{\frac{2gH}{S_1^2 - S_2^2}} \quad (1-6)$$

体积流量

$$Q_v = v_2 S_2 = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2gH}{S_1^2 - S_2^2}} \quad (1-7)$$

由式(1-7)只要读出两根竖管中液面的高度差 H ,就可以测定出流体的体积流量。在工程实际应用中,上式常要乘上一修正因子 $C_v (< 1)$ 。 C_v 叫速度系数,其值与流量计的形状及流速有关,可通过实验测定。

例 1.3 如图 1-5 所示,液槽内离开液面 h 处开一小孔。液体密度为 ρ ,液面上方是空气,它被液槽盖封闭住,其绝对压强为 p ,在液槽侧面小孔处的压强为大气压强 p_0 。当 $p \gg p_0$ 时,试证明小孔处的液流速度为:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho}}$$

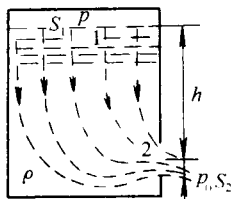


图 1-5 小孔流速

解: 将整个流体当作一个流管,用 v_1 和 v_2 分别表示水面处和孔口处的流速。由连续性方程知 $v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1$,且因为 $S_1 \gg S_2$,故 $v_2 \gg v_1$,可以近似地取 $v_1 = 0$ 。设小孔处的高度为零,则水面处的高度为 h 。又由于孔口与大气相接触,故孔口处压强等于大气压强 p_0 ,对点 1 和点 2 应用伯努利方程,则有

$$p + \rho g h = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

得

$$v_2^2 = \frac{2(p - p_0)}{\rho} + 2gh \quad (1-8)$$

式(1-8)中 $p - p_0$ 称为计示压强, 在 $p \gg p_0$ 的条件下, $2gh$ 与 $2(p - p_0)/\rho$ 相比非常小, 可忽略不计, 于是式(1-8)可简化为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho}} \quad (1-9)$$

若液槽上方不封闭, 则 $p = p_0$, (1-9)式可改写为

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (1-10)$$

式(1-10)叫做托里拆利公式, 它表明任何液体质点从小孔中流出的速度与它从 h 高度处自由落下的速度相等。在实际应用中, 式(1-9)、(1-10)要乘以修正因子 C 。 C 称为比托管修正系数, 其值由实验测定。

(二) 水流抽气机、喷雾器

如图 1-6 所示, 粗细不均匀的水平玻璃管 AB 的细窄处连接一根细管 CD 。使 CD 管的下端插在盛有溶液的容器 E 里。设流体在 A 处的流速、截面、压强分别为 v_1 、 S_1 、 p_1 , 流体在 C 处的流速、截面、压强分别为 v_2 、 S_2 、 p_2 。

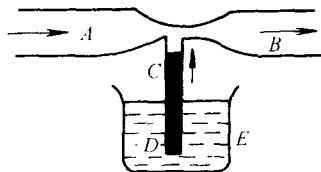


图 1-6 空吸作用

将整个管子作流管, 由连续性方程 $S_1 v_1 = S_2 v_2$, 以及伯努利方程式(1-5), 由于 $S_1 \gg S_2$, 故 $v_2 \gg v_1$, 当流速 v_2 达到一定数值时, 细窄管 C 处压强 p_2 将小于大气压强 p_0 , 容器 E 的溶液便沿着 CD 管上升。我们将流体流速增大时压强减小, 从而产生对周围气体或液体的吸入作用称为空吸作用。空吸作用的应用很广, 水流抽气机就是根据上述空吸作用的原理设计的, 如图 1-7 所示。当水流从圆锥形玻璃管的细口 A 处以高速射出时, 该处的压强很小, 因而将 O 处的空气吸入, 这些被吸入的空气由高速水流带走, 从下面的管中排出。使用时管 O 与要抽气的容器相连接, 而圆锥形细管的上端连接在自来水龙头上。如图 1-8 所示是一种小型家用喷雾器。由于活塞的推动, 空气以较大的速度从喷嘴喷出, 因而喷嘴处的压强减小, 于是贮液器中直管中的液面上升, 被气流吹散成雾状而喷射出去。

(三) 比托管

比托管是常用的流速测定装置之一, 其结构如图 1-9 所示。它是由双层圆头玻璃管组成, 内外管分别通过橡皮管与 U 形管压强计的两管相连, 内管的开口在 A , 外管的开口(即管壁上钻的几个小孔)在 B 。测量时使 A 正对流速方向, 而 B 则与流速方向垂直。当流体流到 A 处, 因为受到阻碍, 其速度变为零。设流经 B 处时流体流速为 v , 忽略 A 、 B 两点的高度差, 由伯努利方程得

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

即

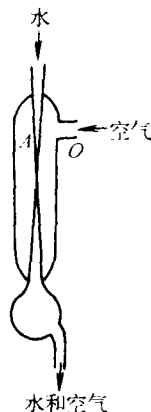


图 1-7 水流抽水机

$$v = \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}} \quad (1-11)$$

式中 ρ ——待测流速液体的密度。

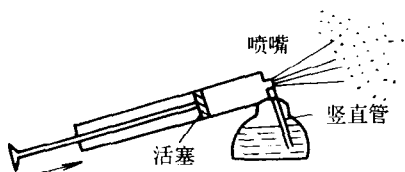


图 1-8 小型喷雾器

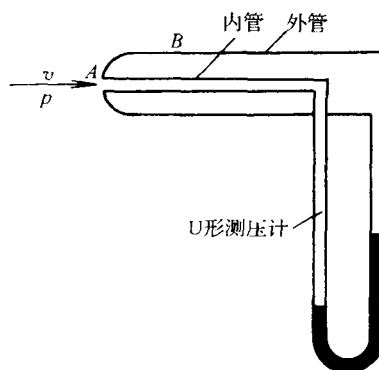


图 1-9 比托管

A、B 两点间的压强差 $p_A - p_B$ 由 U 型压强计读出，用式(1-11)可求得管道中 B 点处的流速。

比托管只适用于流体作稳定流动时流速的测量，对有快速扰动的情况不适用。随着激光技术的发展，现已有激光流速仪。激光流速仪不扰乱原来的流动情况，测量精度极高，并且能测不稳定流体流速的瞬时值和任一截面上的流速分布。激光流速仪已成为研究流体运动的重要仪器。

第三节 粘滞流体的流动

以上讨论的是理想流体作稳定流动时的规律。而常见的各种流体都具有粘滞性。如植物组织中的水分，人体及动物体内的血液以及甘油、蓖麻油等，都具有粘滞性，在长距离输送流体时，就不能忽略由粘滞性引起的损耗。本节将讨论粘滞流体作稳定流动的运动规律。

一、牛顿粘滞定律 粘滞系数

(一) 粘滞力

实际流体在流动时，同一横截面上各点的流速并不相同。若在滴定管中先放一些无色甘油，再在上面加一些着色甘油。当打开滴定管下部的阀门时，可以看到，随着甘油向下流动的进程，着色甘油逐渐变成如图 1-10 所示的舌形。这说明管中轴心处流速最大，越接近管壁，流速越小，在管壁处的甘油则附着在管壁上不动，流速为零。这种各层流速有规则逐渐变化的流动形式，称为层流。实际流体的流速越小，则其分层流动的特性越明显。

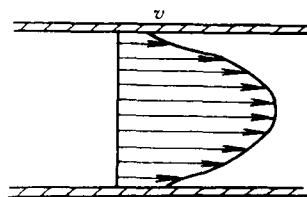


图 1-10 圆管中粘滞流体的流速分布

粘滞流体在流动中各层的流速不同，相邻两流层之间有

相对运动,互施摩擦力,快的一层给慢的一层以向前的拉力;慢的一层则给快的一层以向后的阻力,这种摩擦力称为内摩擦,又称粘滞力。

(二) 牛顿粘滞定律 粘滞系数

流体内相邻两层间内摩擦力的大小,一方面与两流层的接触面积大小有关,另一方面还与两流层间速度变化的快慢有关。如图 1-11 所示,垂直于流速方向上有相距 Δz 的两个流层,速度差为 Δv ,可用 $\frac{\Delta v}{\Delta z}$ 表示速度变化的快慢程度,其物理意义是:垂直于流速方向上相距单位距离的两个流层的速度的变化率。令 $\Delta z \rightarrow 0$ 求极限,得

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta z} = \frac{dv}{dz} \quad (1-12)$$

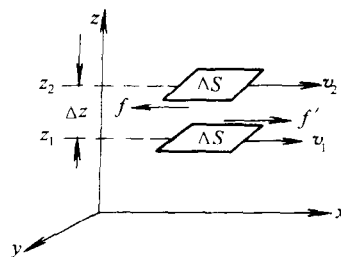


图 1-11 两流层间的粘滞阻力

$\frac{dv}{dz}$ 称为垂直于流速方向的流速梯度(或速度梯度)。

实验表明,流体内部相邻两流层间的内摩擦力 f 与两流层的接触面积 ΔS ,以及两流层处的速度梯度 $\frac{dv}{dz}$ 成正比,这一结论称为牛顿粘滞定律。引入比例系数 η ,则

$$f = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S \quad (1-13)$$

式中 η ——流体的粘滞系数或粘度,单位为帕·秒(Pa·s)。

当接触面积 ΔS 以及速度梯度 $\frac{dv}{dz}$ 恒定不变时,粘滞系数越大,则相邻两流层接触表面间的内摩擦力也越大,因而可以用粘滞系数定量地表示流体粘性的大小。流体的粘滞系数除与流体的性质有关外,还和温度有关。对于液体,温度愈高,粘滞系数愈小;气体则相反,温度愈高,粘滞系数愈大。确定粘滞系数在许多方面有实际的意义,如输送流体的管道设计,机械中润滑油的加入等,都要考虑粘滞系数的大小。又如在化学中,可用 η 测物质的分子量,医学上,由于病变与血液粘滞性变化有关, η 值是诊断学和药学中有价值的参考数据。

表 1-1 列出了一些常见液体在不同温度下的粘滞系数。

表 1-1 流体的粘滞系数

流 体	$T(^{\circ}\text{C})$	$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$	流 体	$T(^{\circ}\text{C})$	$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$
空 气	0	170.8×10^{-7}	汞	0	1.68×10^{-3}
	18	182.7×10^{-7}		20	1.55×10^{-3}
	40	190.4×10^{-7}		100	1.20×10^{-3}
	74	210.2×10^{-7}	酒 精	20	1.240×10^{-3}
水	0	170.2×10^{-5}	蓖麻油	0	5.300
	20	100.0×10^{-5}		20	0.950
	40	65.6×10^{-5}	甘 油	2.8	4.220