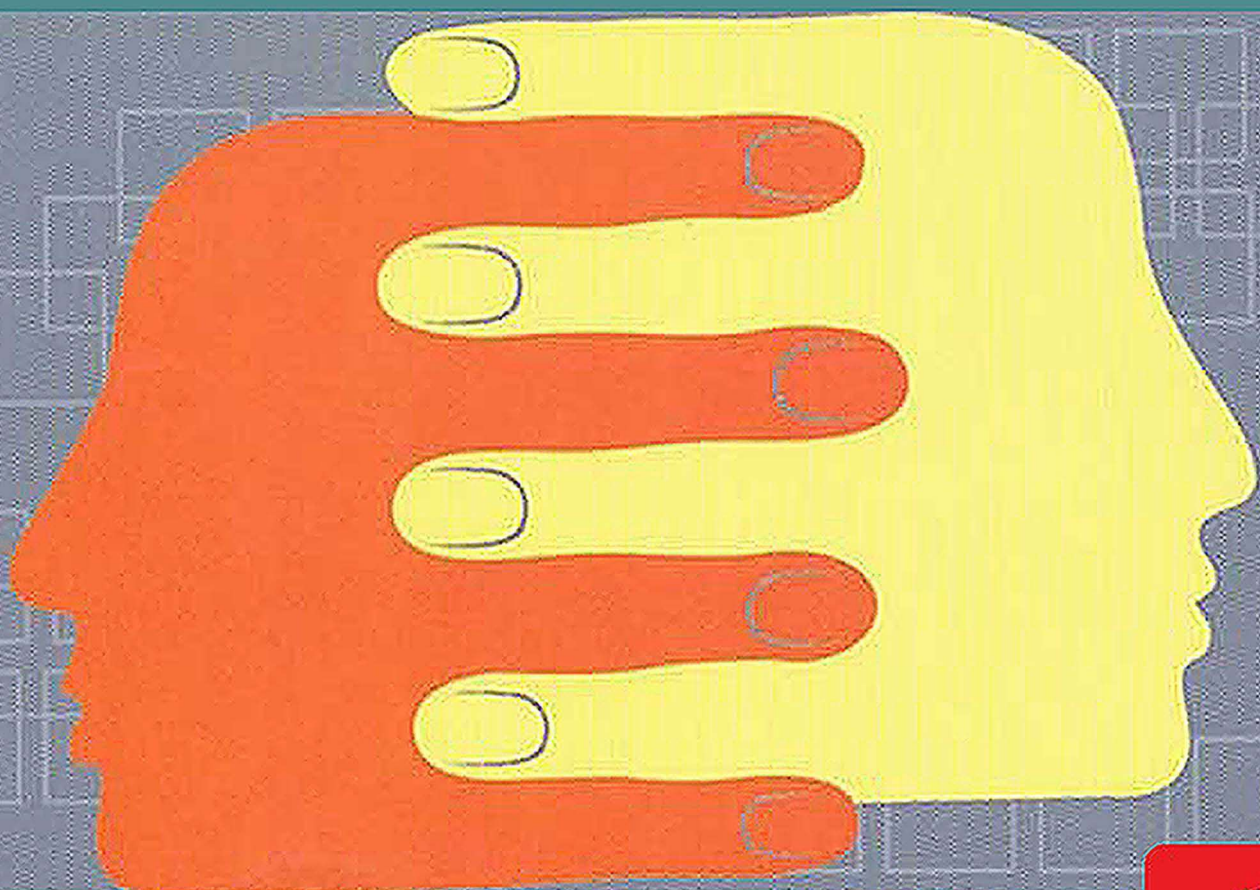


泵与风机及运行

王德明 主编

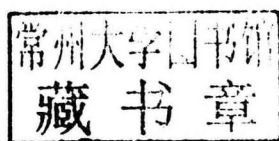


电子科技大学出版社



泵与风机及运行

主 编 王德明
副主编 宋长华 李 松
参 编 朱 晖 何明红 李 昆



 电子科技大学出版社

图书在版编目（CIP）数据

泵与风机及运行 / 王德明主编. —成都：电子科技大学出版社, 2014. 1
ISBN 978 - 7 - 5647 - 2179 - 4

I. ①泵… II. ①王… III. ①泵②风机 IV. ①TH3
②TH4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 009122 号

内 容 简 介

本书讲述了泵与风机相关的流体力学，泵与风机的工作原理、结构、性能等专业基础知识，介绍了泵与风机的启动运行与工况调节，并对其常见故障或问题及其处理措施进行了论述与分析。
本书按照热动与集控专业的泵与风机大纲进行编写，适用于该专业和其他类似专业的教材，还可供电厂辅机运行或技术人员参考。

泵与风机及运行

王德明 主编

宋长华 李 松 副主编

出 版： 电子科技大学出版社（成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦，
邮编：610051。）
策划编辑： 辜守义
责任编辑： 辜守义
主 页： www.uestcp.com.cn
电子邮箱： uestcp@uestcp.com.cn
发 行： 新华书店经销
印 刷： 四川川印印刷有限公司
成品尺寸： 185mm × 260mm 印张 7.25 字数 170 千
版 次： 2014 年 1 月第一版
印 次： 2014 年 1 月第一次印刷
书 号： ISBN 978 - 7 - 5647 - 2179 - 4
定 价： 15.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话：（028）83202323，83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误，请寄回印刷厂调换。

前 言

《泵与风机及运行》是电厂热能动力装置专业（简称热动专业）的核心课程之一，该课程的学习效果，将直接影响学生对后续各门专业课程的学习。随着时代的变迁及企业对人才需要的变化，目前的一些教材已经不适应本专业人才的培养。

另外，热动专业是我校“十二五”发展规划重点建设专业，前身为汽机专业和锅炉专业，开办于1953年，50年来先后为全国电力系统培养了近万名专业技术人员。学生来自全国29个省、直辖市，在校生规模600余名，近三年毕业生平均就业率为98.6%。2009年，中国广东核电集团有限公司（简称中广核集团）在全国高职高专院校中进行遴选，确定我校为首批“订单+联合”培养单位，并在热动专业中选拔优秀学生进行培养，为大亚湾、岭澳、阳江、红沿河、宁德、台山等核电站输送高素质核电运营人才。

热动专业紧紧依托电力行业，主动服务电力工业和地方经济建设，发挥长期以来培养电力技术类中、高级专业技术人才的传统优势，不断推进专业人才培养模式改革和创新，提高人才培养质量，提升学生的职业能力和职业素质。

借国家骨干高职院校建设项目的东风，并依托行业资源优势，我们对“泵与风机及运行”这门课程进行了编写。教材内容注重理论与工程实践的结合，并反映当今泵与风机科技新成果、新水平、新知识。结合专业的特点，教材着重分析泵与风机的基本理论、运行特点、使用中常见的问题及改进措施。

本教材在编写过程中，得到了重庆恒泰电厂、重庆珞璜电厂、贵州大方电厂、贵州黔西电厂等企业及相关专家的大力支持与帮助，在此深表感谢！

本教材的主要编写人员有：重庆电力高等专科学校的王德明、宋长华，重庆恒泰电厂的李松，重庆珞璜电厂的李昆，贵州大方电厂的朱晖、何明红等。

由于编者水平有限，书中难免存在错误与不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2013年9月

目 录

项目一 职业基础.....	1
任务一 流体及其主要物理性质.....	1
任务二 流体静力学.....	4
任务三 流体动力学.....	8
任务四 黏性流体运动及其阻力计算	18
项目总结	27
复习思考	28
项目二 泵与风机的基础知识	31
任务一 泵与风机的分类及工作原理	31
任务二 泵与风机的结构及主要性能参数	35
任务三 泵与风机的叶轮理论	45
项目总结	49
复习思考	49
项目三 泵与风机的性能与相似理论	50
任务一 泵与风机的损失与效率	50
任务二 泵与风机的性能曲线	52
任务三 泵与风机的相似理论	56
任务四 泵与风机的比转速	60
项目总结	62
复习思考	62
项目四 泵与风机的运行及调节	63
任务一 管路性能曲线和工作点	63
任务二 泵与风机的联合运行	66
任务三 运行工况的调节	68
项目总结	73
复习思考	73

项目五 泵与风机运行中的主要问题	74
任务一 泵的汽蚀	74
任务二 喘振现象	79
任务三 轴向力与径向力及其平衡	80
任务四 其他问题	84
项目总结	86
复习思考	86
项目六 火力发电厂中常用的泵与风机	87
任务一 火力发电厂的常用泵	87
任务二 火力发电厂常用的风机	89
项目总结	90
复习思考	90
项目七 某 300MW 机组泵与风机的运行	91
任务一 泵的运行	91
任务二 风机的运行	95
项目八 某 600MW 机组泵与风机的运行	100
任务一 泵的运行.....	100
任务二 风机的运行.....	104
参考文献.....	108

项目一 职业基础

【项目描述】

本项目主要包括流体静力学、流体动力学、黏性流体运动及其阻力计算等相关基础知识。通过本项目的学习，使学生能够正确理解和运用流体力学的相关知识，为泵与风机的学习打下理论基础。

【教学目标】

本项目主要包括流体静力学、流体动力学、黏性流体运动及其阻力计算等相关知识，为泵与风机的学习打下理论基础。

1. 理解并掌握连续性方程；
2. 理解并掌握能量方程；
3. 理解并掌握动量方程；
4. 理解并掌握动量矩方程。

【教学环境】

1. 教学场地：一体化多媒体教室、流体力学实验室及实训中心
2. 教学材料与设备：流体力学实验室
3. 教学参考资料：
 - (1) 孙丽君. 工程流体力学（第1版）. 北京：中国电力出版社，2005.
 - (2) 杨诗成. 泵与风机（第2版）. 北京：中国电力出版社，2004.
 - (3) 张燕侠. 流体力学——泵与风机. 北京：中国电力出版社，2007.

任务一 流体及其主要物理性质

【教学目标】

1. 知识目标
 - (1) 理解并掌握流体的概念；
 - (2) 理解并掌握流体的主要物理性质。
2. 能力目标
 - (1) 能够正确理解流体连续性介质的概念；
 - (2) 能够正确理解流体的各个主要物理性质。
3. 素质目标
 - (1) 具有良好的信息收集、分析和处理能力；

(2) 养成严谨求实的学习作风。

【任务描述】

对流体的概念进行讨论，并对流体的主要物理性质进行分析，在理解并掌握的基础上，提交分析报告。

【任务准备】

1. 引导问题

学习完相关知识后，须回答下列问题：

(1) 什么是流体？

(2) 流体的主要物理性质有哪些？

2. 制订试验方案

在正确回答引导问题后，讨论并分析流体的概念及其主要物理性质。

【任务实施】

1. 首先对流体的概念进行定义；

2. 对流体连续性介质概念进行讨论；

3. 对流体的主要物理性质进行分析与讨论。

【相关知识】

一、流体及其特征

1. 流体的概念

在任何微小剪切力作用下均能连续变形的物质，称为流体。这种连续变形的特性叫做流动性。正因为流体的流动性，使其没有固定形状，所以其形状取决于容器的形状。

地球上物质存在的主要形式——固体、液体和气体。

流体和固体的区别：固体既能承受压力，也能承受拉力与抵抗拉伸变形；而流体只能承受压力，一般不能承受拉力与抵抗拉伸变形。因此流体易变形，没有固定形状。

液体和气体的区别：相比之下，气体易于压缩，并能充满任意形状容器的空间，无一定的体积，不存在自由液面；而液体难于压缩，有一定的体积，存在一个自由液面。

2. 连续性介质概念

从微观的角度看，流体是由大量做无规则运动的分子组成的，分子之间存在空隙。但从宏观的角度看，流体微粒在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间都比分子距离和分子碰撞时间大得多，表征为连续地充满其所占空间。

连续介质模型：把流体视为没有间隙地充满它所占据的整个空间的一种连续介质，且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型。

二、主要物理性质

1. 惯性

物体反抗外力作用而维持其固有的运动状态的性质，其大小以质量来量度。

2. 压缩性

流体体积随压力增大而减少的性质，称为流体的压缩性。密度不随压力变化而变化的流体称为不可压缩流体；而密度随压力变化而变化的流体称为可压缩流体。

3. 膨胀性

流体体积随温度升高而增大的性质，称为流体的膨胀性。

4. 黏性

黏性是流体在运动的状态下，产生内摩擦力以抵抗流体变形的性质。流体的黏度是由流动流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。

牛顿内摩擦定律（黏性定律）：液体运动时，相邻流体层间所产生的切应力与剪切变形的速率成正比。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

(1-1)

式中， μ 为动力黏度，其值表示单位速度梯度时单位接触面积上的切应力。动力黏性系数，又称绝对黏度、动力黏度、黏度，是反映流体黏滞性大小的系数。单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

牛顿流体，满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体；而不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。

运动黏性系数 ν ：又称相对黏度、运动黏度。单位为 m^2/s 。动力黏度与运动黏度的换算关系如下：

$$\mu = \rho \nu$$

(1-2)

水和空气在一个标准大气压下，不同温度时的动力黏度和运动黏度如表 1-1 所示。

表 1-1 水和空气的动力黏度和运动黏度

温度 (℃)	水		空气	
	μ ($\times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	μ ($\times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
0	1788	1.792	17.16	13.70
10	1308	1.306	17.80	14.70
20	1002	1.003	18.08	15.70
30	801	0.805	18.73	16.61
40	653	0.658	19.20	17.60
50	547	0.553	19.60	18.60
60	470	0.478	20.10	19.60
70	404	0.413	20.40	20.50
80	354	0.364	21.00	21.70
90	315	0.326	21.58	22.90
100	282	0.294	21.80	23.78

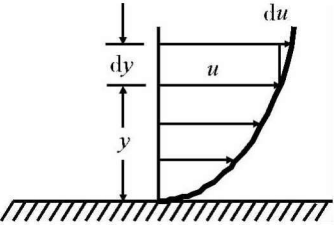


图 1-1 流动速度分布

流体黏度的大小随流体种类的不同而不同，并随压强、温度的变化而变化。

- (1) 流体种类。一般地，相同条件下，液体的黏度大于气体的黏度。
- (2) 压强。对常见的流体，如水、气体等， m 值随压强的变化不大，一般可忽略不计。
- (3) 温度。温度是影响黏度的主要因素。当温度升高时，液体的黏度减小，气体的黏度增加。对于液体，内聚力是产生黏度的主要因素，当温度升高，分子间距离增大，吸

引力减小，因而使剪切变形速度所产生的切应力减小，其黏度也减小；而对于气体，分子间距离大，内聚力很小，所以黏度主要是由气体分子运动动量交换的结果所引起的，温度升高，分子运动加快，动量交换频繁，其黏度增加。

理想流体为没有黏性或不考虑黏性的流体。

非理想流体为有黏性的流体，又称实际流体。

5. 表面张力

液体内部分子作用于分界面处的分子，而使液面具有收缩趋势，在收缩反方向存在一个力，称为表面张力或界面张力。

三、作用在流体上的力

1. 质量力

质量力与流体的质量密切相关，主要有重力和惯性力。

2. 表面力

表面力存在于流体微团表面，有法向应力和切向应力，法向应力对应流体受到的压力，切向应力对应流体受到的黏性力。

任务二 流体静力学

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握流体静压力的特性；
- (2) 掌握流体静力学基本方程。

2. 能力目标

- (1) 能够利用静力学基本方程进行相应的计算；
- (2) 能够对简单的固体壁面受到的总压力进行计算。

3. 素质目标

- (1) 具有良好的信息收集、分析和处理能力；
- (2) 养成严谨求实的学习作风。

【任务描述】

在掌握流体静力学基本方程的基础上，对静止流体相互间的压力以及固体壁受到的总压力进行计算。

【任务准备】

1. 引导问题

学习完相关知识后，须回答下列问题：

- (1) 流体静压力的特性是什么？
- (2) 流体静力学基本方程各项的物理意义和几何意义各是什么？

2. 制订试验方案

在正确回答引导问题后，对流体静力学基本方程进行灵活应用。

【任务实施】

1. 对流体静压力及其特性进行讲解；
2. 对流体静力学基本方程进行讨论与分析；
3. 利用静力学基本方程求解相关问题。

【相关知识】

一、流体静压力及其特性

1. 流体静压力

流体单位面积上受到的正压力即为流体静压力。

2. 流体静压力的特性

流体静压力有两个重要特性：①流体静压强的方向必然重合于受力面的内法线方向；②在平衡流体中，沿各个方向作用于同一点的静压力的大小相等，与作用方向无关。简要证明如下：

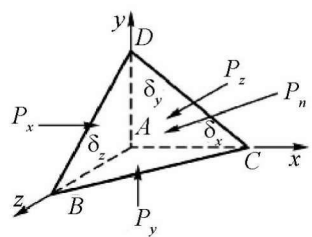


图 1-2 四面体受力分析

如图 1-2 所示，力在 x 方向的平衡方程为

$$p_x \times \frac{1}{2} \delta y \delta z - p_n \times A_{\Delta BCD} \cos(\hat{p}_n, x) + f_x \rho \frac{1}{6} \delta x \delta y \delta z = 0 \quad (1-3)$$

$$A_{\Delta BCD} \cos(\hat{p}_n, x) = \frac{1}{2} \delta y \delta z \quad (1-4)$$

$$p_x - p_n + f_x \rho \frac{1}{3} \delta x = 0 \quad (1-5)$$

忽略无穷小量有： $p_x = p_n$ ，同理有： $p_y = p_n, p_z = p_n$ ，即

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (1-6)$$

这就证明静压强与空间方位无关，它是空间坐标的连续函数，即

$$p = p(x, y, z) \quad (1-7)$$

二、流体平衡微分方程

如图 1-3 所示，在平衡流体中取一微元六面体，边长分别为 d_x, d_y, d_z ，设中心点的压强为 $p(x, y, z) = p$ ，对其进行受力分析：

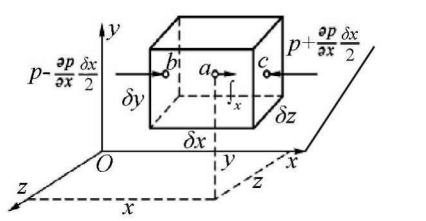


图 1-3 六面体 x 方向受力分析

x 方向：

$$f_x \rho \delta x \delta y \delta z + \left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \delta y \delta z - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \delta y \delta z = 0 \quad (1-8)$$

$$f_x \rho \delta x \delta y \delta z - \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \delta y \delta z = 0 \quad (1-9)$$

$$f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1-10)$$

同理得

$$f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1-11)$$

即

$$f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1-12)$$

式(1-12)方程是欧拉1755年首先提出的, 又称欧拉平衡微分方程式。由此可得压力的全微分方程为

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = \rho(f_x dx + f_y dy + f_z dz) \quad (1-13)$$

式(1-13)称为压差公式, 静压力的增量取决于质量力。由压力相等的点组成的面称为等压面, 其微分方程为

$$f_x dx + f_y dy + f_z dz = 0 \quad (1-14)$$

式(1-14)为等压面微分方程。它说明, 作用于静止流体中任一点的质量力必垂直于通过该点的等压面。对不可压流体和可压流体正压流场, 等压面也是等势面, 质量力不但垂直它们, 而且始终指向势减小, 也即压强增加的方向。

三、流体静力学基本方程

由于质量力 $f_x = f_y$, $f_z = -g$, 由压差公式可得

$$dp = -\rho g dz \quad (1-15)$$

即

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{Const} \quad (1-16)$$

式(1-16)即为流体静力学基本方程, 它适用于只有重力作用下处于平衡状态的均质不可压缩流体。其物理意义: 第一项为重力势能(位能), 第二项为压力势能(压力能), 二者和称为总势能; 几何意义: 第一项为位置水头, 第二项为压力水头, 二者和称静水头, 连线称静水头线。

四、流体压力的表示方法

1. 压力的计量

绝对压力: 以完全真空为基准计量的压强, 用 p 表示。

相对压力: 以当地大气压力为基准, 比大气压高的压力, 用 p_g 表示。其中, 大气压力用 p_a 表示。

真空: 以当地大气压力为基准, 比大气压低的压力, 用 p_v 表示。真空也称为真空值或真空度。

三者之间的关系为

$$p_g = p - p_a = -p_v \quad (1-17)$$

2. 液柱式测压计

液柱式测压计主要有: 测压管、U形管测压计、U形管差压计、差压计、倾斜微压计

等，分别如图 1-4 ~ 图 1-7 所示，其测压原理是基于压差公式（1-15）的积分形式，即

$$p = -\rho g \Delta z \tag{1-18}$$

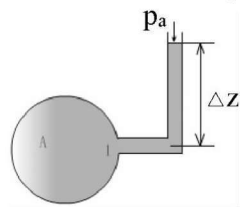


图 1-4 测压管

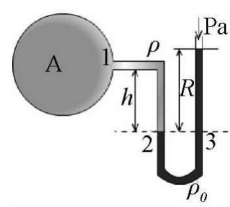


图 1-5 U形管测压计

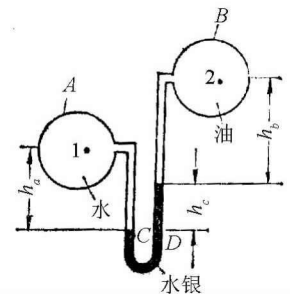


图 1-6 差压计

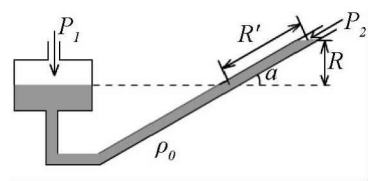


图 1-7 倾斜微压计

例 1-1，如图 1-8 所示， $h_1 = 0.6\text{m}$ ， $h_2 = 0.25\text{m}$ ， $h_3 = 0.2\text{m}$ ， $h_4 = 0.3\text{m}$ ， $h_5 = 0.5\text{m}$ ， $\rho_1 = 1000\text{kg/m}^3$ ， $\rho_2 = 800\text{kg/m}^3$ ， $\rho_3 = 13598\text{kg/m}^3$ ，求 AB 两点的压差。

解： $p_A - p_B = \rho_1 g(h_5 - h_4) + \rho_3 g h_4 - \rho_2 g h_3 + \rho_3 g h_2 - \rho_1 g h_1 = 67867 \text{ (Pa)}$

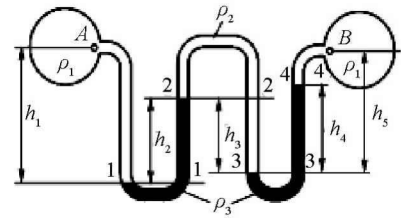


图 1-8

3. 金属压力表

当需要测量的压力较大时，如火电厂中给水、循环水、蒸汽以及日常生活中的自来水等的压力均已达到兆帕级，采用测压管无法达到要求，工程上经常用的测压装置为金属压力表，其结构形式如图 1-9 所示。

4. 压力的计量单位

(1) 压力的国际单位是帕，用符号 Pa 表示。更大的单位是 kPa、MPa 等，工程实践中常用的压力表单位就是 MPa。

(2) 压力也可用液柱表示，如水柱、汞柱等，但在实用中应有确定的密度，因为 $h = p / (\rho g)$ 。

(3) 另外，压力的计量单位在工程中还有标准大气压、工程大气压、巴 (bar) 等。

五、静止流体作用在壁面上的总压力

若要求如图 1-10 所示曲面壁 ABCD 部分所承受的总压力 P，可先将总压力 P 分解为垂直分力 P_z 、水平分力 P_x 。垂直分力如图 1-10 (b) 图所示，水平分力如图 1-10 (c) 图所示。则曲面壁 ABCD 在垂直方向上受到的分力、水平方向上受到的分力和受到的总压

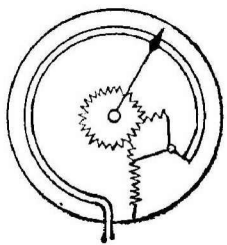


图 1-9 金属压力表

力及其作用点的确定分别如下。(曲面壁上的总压力见图 1-2。)

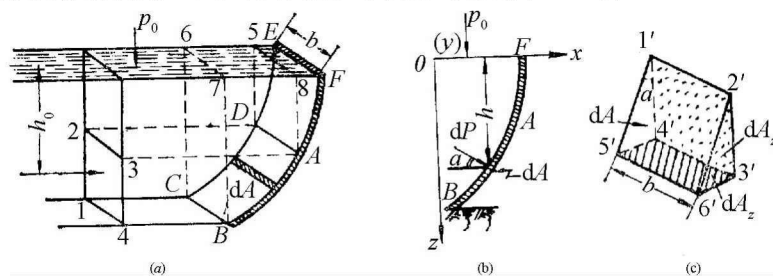


图 1-2 曲面壁上的总压力

1. 在垂直方向上受到的分力为:

$$P_z = \rho g V_p \quad (1-19)$$

V_p 为曲面 $ABCD$ 垂直向上至自由液面或其延伸面的几何空间体积, 即压力体, 如图中的 $ABCD5678$ 所组成的几何空间体。

2. 在水平方向上受到的分力为:

$$P_x = \rho g h_c A_x \quad (1-20)$$

A_x 为曲面 $ABCD$ 在垂直面上的投影面积, 即如图 1-10 (c) 所示 1234 所组成的面积; h_c 为投影面积 A_x 的形心在水面下的深度。

3. 总压力的大小与方向用公式分别表示为

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} \quad (1-21)$$

$$\alpha = \arctan(P_z/P_x) \quad (1-22)$$

4. 作用点的确定:

垂直分力 P_z 的作用点为图示压力体 $ABCD5678$ 的重心, 水平分力 P_x 的作用点为投影面积 A_x 的压力中心。其中 A_x 的压力中心

$$z = z_c + \frac{J_c}{z_c A_x} \quad (1-23)$$

总压力的作用点为: 作出 P_z 、 P_x 的作用线, 得交点, 过交点按 α 做作用线, 与曲面的交点, 即为 P 的作用点。

以上所述曲面为矩形或其展直面为矩形。若要求非规则曲面上受到的总压力, 可采用高等数学中求微分的思想, 将该曲面划分为许多个小块来求解即可。

任务三 流体动力学

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握连续性方程;
- (2) 掌握能量方程;
- (3) 掌握动量方程;

(4) 掌握动量矩方程。

2. 能力目标

(1) 能够正确理解各动力学方程；

(2) 能够利用各动力学方程求解相关问题。

3. 素质目标

(1) 具有良好的信息收集、分析和处理能力；

(2) 养成严谨求实的学习作风。

【任务描述】

熟悉并掌握各动力学方程，并利用各动力学方程求解相关流体力学的问题。

【任务准备】

1. 引导问题

学习完相关知识后，须回答下列问题：

(1) 连续性方程的实质是什么？

(2) 伯努利方程各项的物理意义与几何意义是什么？

(3) 如何运用动量矩方程获得泵与风机的扬程或全压？

2. 制订试验方案

在正确回答引导问题后，对各动力学方程进行讨论与分析。

【任务实施】

1. 从流体运动的研究方法入手，讨论流动的分类及流体动力学的基本概念；

2. 对各动力学方程进行分析与讨论，并利用它们求解相关问题。

【相关知识】

一、研究流体运动的方法

1. 拉格朗日法

它以流场中每一流体质点作为描述对象，以流体个别质点随时间的运动为基础，通过综合足够多的质点（即质点系）运动求得整个流动的方法。即质点系法。

流体质点随时间的运动轨迹称为迹线。

2. 欧拉法

欧拉法是以流体质点流经流场中各空间点的运动，即以流场作为描述对象研究流动的方法。即流场法。

它不直接追究质点的运动过程，而是以充满运动液体质点的空间——流场为对象，研究各时刻质点在流场中的变化规律，将个别流体质点运动过程置之不理，而固守于流场各空间点。通过观察在流动空间中的每一个空间点上运动要素随时间的变化，把足够多的空间点综合起来而得出的整个流体的运动情况。

二、流动的分类

1. 按流体性质的不同来划分

(1) 可压缩流体的流动和不可压缩流体的流动；

(2) 理想流体的流动和黏性流体的流动；

(3) 牛顿流体的流动和非牛顿流体的流动；

(4) 磁性流体的流动和非磁性流体的流动。

2. 按流动特征的不同来划分

(1) 有旋流动和无旋流动；

(2) 层流流动和紊流流动；

(3) 定常流动和非定常流动；

(4) 超声速流动和亚声速流动。

3. 按照流动空间的不同来划分

(1) 内部流动和外部流动；

(2) 一维流动、二维流动和三维流动。

三、流体动力学的基本概念

1. 运动要素

表征流体运动状态的物理量，如压力、流速等。

2. 迹线与流线

迹线是流场中流体质点的运动轨迹线。

欧拉法常用流线组成的几何图形来描述复杂的运动。所谓流线是指流场中同一瞬时一系列连续质点流动方向的空间曲线，在该曲线上各点的切线方向即是该流体质点的速度方向。

在定常流动中，流线和迹线重合；流线不能彼此相交和折转；流线密集的地方流体流动的速度大。只有在速度为零或无穷大的点，流线可以相交，因这些点上会出现同一点上存在不同流动方向的问题。速度为零的点称驻点，速度无穷大的点称奇点。

3. 流管、流束、流量等

(1) 流管：在流场中作一既不是流线又不相交的封闭曲线，过该曲线上所有流线组成的管状表面。

(2) 流束：流管内的流体。

(3) 有效截面：处处与流线相垂直的流束的截面，用 A 表示。

(4) 缓变流：流线的夹角很小，曲率半径很大，近乎平行直线。

(5) 急变流：不满足缓变流条件的。

(6) 流量：流经有效截面的流体的量。若此量为体积则为体积流量，用 q_v 表示；若此量为质量则为质量流量，用 q_m 表示。质量流量与体积流量之间的关系为：

$$q_m = \rho q_v \quad (1-24)$$

(7) 流速：工程中常用有效截面的平均流速，可用式 (1-25) 表示：

$$v = \frac{q_v}{A} \quad (1-25)$$

(8) 湿周：在总流的有效截面上，流体与固体边界接触部分的周长。

(9) 水力半径：总流的有效截面积 A 和湿周之比。

湿周和水力半径的概念在非圆截面管道或渠道的水力计算中常常用到。

4. 系统与控制体 (见图 1-11)

(1) 系统

系统是一团流体质点的集合。在运动过程中，系统始终包含着确定的这些流体质点，

有确定的质量，而其表面常常不断地变形。

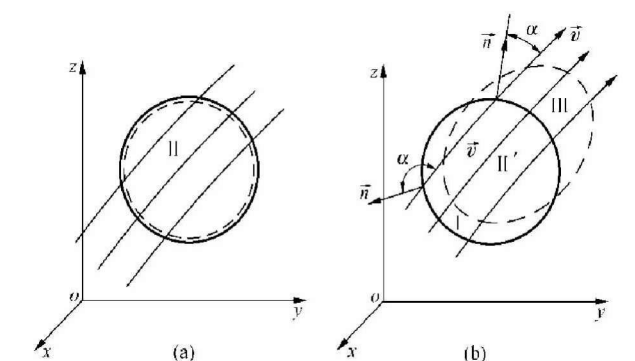


图 1-11 系统与控制体

注：系统边界用虚线，控制体边界用实线表示

(2) 控制体

控制体是指流场中某一确定的空间区域，这个区域的周界称为控制面。控制体的形状是根据流体流动情况和边界位置任意选定的，一旦选定之后，就不象系统边界那样随着流体的流动而变化。控制体的形状和位置相对于所选定的坐标系来讲是固定不变的。

(3) 输运公式（随体导数）

下面推导流体系统所具有的物理量对时间的随体导数。设 N 为系统在 t 时刻所具有的某种物理量（如质量、动量、能量等）的总量， η 表示单位质量流体所具有的该种物理量，即

$$N = \iiint_V \eta \rho dV \quad (1-26)$$

在 t 时刻系统所占有的空间体积为 Π ，并与与选的控制体重合，如图 1-11 (a) 所示。在 $t + \delta t$ 时刻系统所占有的空间体积为 $\Pi + \Pi'$ ，如图 1-11 (b) 所示。 Π' 是系统在 $t + \delta t$ 时刻所占有的空间与原来 t 时刻所占有的空间（即控制体 Π ）相重合的部分。在 t 时刻系统内的流体所具有的某种物理量对时间的导数为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_V \eta \rho dV = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(\iiint_{V'} \eta \rho dV)_{t+\delta t} - (\iiint_V \eta \rho dV)_t}{\delta t} \quad (1-27)$$

式中， V' 为 $t + \delta t$ 时刻系统的体积； V 为系统 t 时刻系统的体积。

由图 1-11 (b) 中可以看出，体积 V' 中包含 Π' 和 Π 两部分，而体积 V 包含 Π' 和 Π 两部分，于是可将式 (1-27) 写为

$$\frac{dN}{dt} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(\eta \rho dV)_{t+\delta t} - (\eta \rho dV)_t}{\delta t} + \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(\eta \rho dV)_{t+\delta t} - (\eta \rho dV)_t}{\delta t} \quad (1-28)$$

式中，下标 t 或 $t + \delta t$ 表示对该时刻的值求体积分。当 $\delta t \rightarrow 0$ 时， $\Pi' \rightarrow \Pi$ ， $\Pi \rightarrow 0$ ，即在 t 时刻系统体积与控制体体积相重合。若控制体体积用 CV 表示，则有 $\Pi = V(t) = CV$ 。因此式 (1-28) 右端第一项为

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(\eta \rho dV)_{t+\delta t} - (\eta \rho dV)_t}{\delta t} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(\eta \rho dV)_{t+\delta t} - (\eta \rho dV)_t}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \eta \rho dV \quad (1-29)$$