

流体力学及流体机械

上海科学技术出版社

高等学校教学用书

流体力学及流体机械

东北工学院 李富成 主编

冶金工业出版社

2F68/01

高等学校教学用书

流体力学及流体机械

东北工学院 李富成 主编

冶金工业出版社出版

《北京市书刊登记证》

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 14 7/8 字数392千字

1980年1月第一版 1981年9月第二次印刷

印数16,001~22,300册

统一书号: 15062·3505 定价1.85元

前 言

本书是根据一九七八年冶金工业部制定的矿山机械专业教学计划和流体力学及流体机械课程教学大纲编写的。全书分两篇共八章。第一篇为流体力学，包括流体静力学、运动学及动力学、流体运动各种阻力、流体动力相似原理。第二篇为流体机械，包括离心泵，离心及轴流通风机。

流体力学部分以阐述不可压缩流体力学内容为主，兼顾可压缩流体力学内容。为使计算简单，概念清楚，流体质点运动微分方程式是采用欧拉法以矢量形式建立的。本书所用的矢量分析公式，均列入附录A内。为了结合分析透平压缩机械内部的流体流动，书中既论述了流体质点运动微分方程式在绝对坐标系中的数学表达式，也讨论了这些微分方程式在绕固定轴以等角速旋转的相对运动坐标系中的数学表达式。采用的坐标系有笛卡尔直角坐标系，也有轴对称正交曲线坐标系；在分析透平压缩机内部流体三元流动时，还引用了准正交曲线坐标系。如果读者不熟悉曲线坐标系方面的知识，可参阅附录A2。为了使读者对透平压缩机械内流体三元流动有初步了解，还介绍了当今广泛流行而又最简单的准三元流动分析方法。同时也比较详细地讨论了流体运动阻力的计算；对流体动力相似原理作了必要的论述，并结合离心及轴流通风机，讨论了相似原理的应用；还简要地说明了离心及轴流通风机、泵工作原理、性能参数、运转调整原理以及选择计算方法。

本书讲述了一般实验方法，每章都附有例题及习题。

本书图中字母上带箭头“ $\rightarrow$ ”者及文中黑体字母均表示矢量，二者意义相同。

本书可作高等学校冶金矿山机械专业师生教学使用，也可供

从事流体力学及流体机械工作的工程技术人员参考。

本书由东北工学院李富成任主编。第一、二、三、六、八章由李富成编写，第四、五章由昆明工学院叶汝裕编写，第七章由武汉钢铁学院刘元杰编写。本书经叶汝裕（昆明工学院）、李乐静（北京钢铁学院）、翁志洪（江西冶金学院）、胥学仁（重庆大学）、刘春生（贵州工学院）、杜琼仙、刘云峰（云南工学院）共同审定。由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，希望广大读者批评指正。

编 者

1978年8月

绪 论

一、流体力学及流体机械的主要内容

流体力学及流体机械主要讨论流体的物理性质、不可压缩与可压缩流体的绝对运动与相对运动之基本方程式，流体运动阻力计算，流体动力相似原理及其在通风机方面的运用，离心和轴流通风机与泵的工作原理及性能。

二、流体力学及流体机械发展简介

流体力学是最古老的学科之一。

远在两、三千年前，中国、埃及、希腊、罗马、印度等国，在输水管、灌溉水渠和堤坝建筑中，总结出的经验就为流体力学奠定了基础。相传我国的大禹治水，时间就更早了。两千多年前我国秦代，勤劳智慧的人民在四川成都平原修建了中外闻名的水利灌溉系统，使成都平原变为“天府之国”起了重大作用。理论来源于实践。早在公元前二百五十年，著名学者阿基米德根据实践中累积起来的有关水的自然属性，写出了“论浮体”的科学论文，这篇论文提出了浮力定理。流体力学中论述流体运动与平衡最主要最基本的理论是十八世纪建立起来的。瑞典科学家伯努利（1700~1782年）在其著作“水动力学或关于流体运动和阻力的备忘录”中提出了理想液体流束中静压力与速度关系的方程式，即伯努利方程式。至今，这个方程式还是流体力学的最基本方程式之一。瑞典学者欧拉提出的理想流体平衡和运动的微分方程式为进一步发展理论流体力学奠定了基础。俄国科学家罗蒙诺索夫（1711~1765年）所研究的气体运动理论确定了热能与机械能互相转换的关系，把流体力学与热力学互相联系了起来。俄国学者儒考夫斯基最早提出的机翼升力理论为飞机飞行理论奠定了基础。流体动力相似理论是指导流体力学进行科学实验的理论基

础。1848年法国科学院院士别尔特朗利用相似变换的方法，指出了机械运动相似的最普遍的原理和机械运动相似常数的存在，这实际上是确定了力学相似理论第一定理。其后，在1878年别尔特朗又提出了物理方程式的齐次性质，指出了方程式中各物理量之间的数学关系必然可以组成相似准数之间的关系，这也就给相似理论第二定理奠定了基础。目前因次分析中使用的柏金安定理（ π 定理）就是相似理论第二定理的应用。相似理论第一、二定理是从正面阐明了现象相似时所具有的性质，也称为相似理论正定理。如何判断现象的相似性，即现象相似的充分与必要条件是什么？这是相似理论中十分重要的问题。1933年苏联学者基尔比切夫解决了相似理论第三定理或相似理论逆定理。至此相似理论渐趋完善。但是近二十多年来由于宇航技术的发展，进一步对超高声速气流的理论进行实验研究，经典的流体动力相似理论就显得不够用了。在研究超高声速气流的相似理论方面，我国著名的力学家钱学森教授首先作出了贡献，他早在1946年就写出了“超高声速流的相似律”的论文。

近几十年来由于生产技术的发展，流体力学出现了新的分支——电磁流体力学与化学流体力学。电磁流体力学是研究导电体（液体或气体）介质与电场、磁场相互作用的科学。这里流体介质的运动不仅要服从流体力学的规律，同时还要服从电磁学的规律。电磁流体力学在天文学、核子物理学、宇航技术方面的应用越来越广泛。化学流体力学是研究流体中有化学变化、有热产生或热吸收的动力学。例如冶金炉的理论基础是流态化的流体力学问题。它不仅有流体的运动，而且还有流体成分的变化。

超高声速流体力学、电磁流体力学、化学流体力学均属于近代流体力学，都是近几十年发展起来的。

流体机械中的泵与通风机在很早以前就为人们所熟悉而加以使用，例如简易的扬水器——汲水吊桶、绞盘或辘轳、扬水轮。很早我国在冶金上使用的鼓风机，在农业上使用的磙谷风车，实际上就是泵与通风机的雏形。

二十世纪初，炼铁高炉容量逐渐增大，出现了大型鼓风机。这时开始用离心鼓风机代替往复鼓风机。

近代透平压缩机械中的压缩机、通风机、泵的工作原理，早在中世纪已经为人们所认识。由于当时技术水平限制，制造不出效能高的压缩机、通风机和泵。1754年瑞典学者欧拉提出了离心透平机械理论压力方程式。这个方程式给离心透平机械的设计提供了一定的理论根据。儒考夫斯基创立的透平机械叶片理论，使透平机械理论向前发展了一步。欧拉透平机械理论压力方程式、儒考夫斯基透平机械叶片理论分别是以流束理论、二元平面流动理论为基础的，这在一定范围内可以使用。而在一般情况下透平机械内部流动是三元流动，上述理论就显得欠缺。本世纪四十年代末五十年代初，能够反映在一般情况下透平机械内部流动的三元流动理论开始问世。1952年我国著名的工程热物理学家吴仲华教授等发表的“轴流、离心及混流透平机械内亚声与超声速三元流动一般理论”论文中，建立了理想气体在透平机械内流动的方程组，提出了求解这些方程组的流线曲率法。这就开始了根据透平机械内部流动规律用流线曲率法来进行透平机械的设计与内部流动的分析工作，从而使透平机械设计理论大大跨前了一步。为了简化透平机械内部三元流动分析以减轻计算工作量，近十几年来又出现了准三元流动理论。例如，分析透平机械叶轮内三元流动时，分别分析叶轮子午面上的流动与回转面上的流动。虽然这种方法还是采用流线曲率法，但在计算过程中利用了任定的准正交线。当准正交线一经设定之后，其后流线改变在进行迭代运算过程中，此准正交线就不再改变了。这种方法比较简便，大大减轻了计算工作量，而被广泛使用。透平机械内部三元流动理论计算，目前还局限于稳定运动的理想流体的流动，要考虑流动损失时，必须对假定为理想流体之流动结果进行修正。对于非稳定运动的粘性流体三元流动理论计算尚需要作大量工作。

三、学习方法

流体力学及流体机械都是理论性与实践性比较强的一门学

目 录

绪 论	V
第一篇 流体力学	
第一章 流体的主要物理性质	1
第一节 流体的主要物理性质	1
第二节 流体的粘度	6
习 题	11
第二章 流体静力学	12
第一节 流体静压力及其特性	12
第二节 流体绝对静止微分方程式及其积分	15
第三节 液体作用在壁面的静力	26
第四节 流体相对静止微分方程式及其积分	35
第五节 流体静压力的表示方法及度量	42
习 题	46
第三章 流体运动学及动力学	49
第一节 概述	49
第二节 流体质点运动的速度、加速度	53
第三节 流体运动连续方程式	74
第四节 理想流体质点绝对运动微分方程式	86
第五节 理想流体质点绝对运动微分方程式的积分	104
第六节 理想流体质点相对运动微分方程式	130
第七节 理想流体质点相对运动微分方程式的积分	138
第八节 实际流体绝对运动总流能量方程式	166
第九节 实际流体稳定相对运动总流能量方程式	184
第十节 流体运动的动量方程式	187
第十一节 流体运动动量矩方程式	205
习 题	207
第四章 流体运动阻力计算	210

第一节	概述	210
第二节	流体运动阻力的两种型式——沿程阻力和局部阻力	215
第三节	均匀流动的基本方程式	216
第四节	流体运动的两种状态——层流和紊流	218
第五节	流体在圆管中的运动及沿程阻力计算	222
第六节	圆管流动中的局部阻力计算	242
第七节	有压管道水力计算	246
第八节	有压管中的水击	261
第九节	通过小孔和缝隙的流量计算	270
习 题		283
第五章	流体动力相似原理与因次分析法	284
第一节	流体动力相似所具有的性质	284
第二节	动力相似准数	289
第三节	因次分析	296
习 题		301

第二篇 流体机械

第六章	流体机械理论基础	302
第一节	离心及轴流通风机、泵的工作原理	302
第二节	离心及轴流通风机、泵的主要性能参数	303
第三节	离心通风机、泵叶轮叶片为无限数时的理论压力、 压头方程式	305
第四节	离心通风机、泵叶片为有限数时理论压力、压头方程式 ...	308
第五节	离心通风机、泵理论流量	312
第六节	离心通风机、泵理论压力、压头性能曲线	313
第七节	离心通风机、泵叶轮叶片出口角 β_2 对叶轮叶片为 无限数时理论压力、压头之影响	317
第八节	离心通风机、泵实际压力、压头性能曲线	320
第九节	轴流通风机理论压力与实际压力性能曲线	323
第十节	通风机、泵外部管道性能曲线	327
第十一节	通风机、泵实际单体性能曲线、工作区、工作点	329
第十二节	通风机稳定工作与不稳定工作	332
第十三节	通风机并联工作与串联工作	337
第十四节	通风机的相似原理	343

第十五节 离心通风机的选择计算方法	352
第十六节 通风机相似设计方法	356
习 题	359
第七章 水泵	360
第一节 离心泵概述	360
第二节 多级离心泵性能及结构简述	361
第三节 多级离心泵主要零部件	363
第四节 离心泵轴向推力的产生及其平衡方法	365
第五节 离心泵的吸水高度与气蚀现象	367
第六节 离心泵在高海拔地区的工作	370
第七节 离心泵性能实验	370
第八节 离心泵排水设备的选择计算	375
第九节 特殊泵	383
习 题	386
第八章 通风机	387
第一节 通风机概述	387
第二节 通风机构造简述	387
第三节 通风机全压、静压、动压概念	393
第四节 实验室条件下通风机性能实验	396
第五节 矿井条件下通风机性能实验	403
第六节 通风机调整方法	405
第七节 通风机的选择计算	409
第八节 通风机噪音的产生及消声措施	413
第九节 通风机在高海拔地区的工作	421
习 题	423
附录 A	424
A1 矢量的微分计算	424
A1-1 矢量函数对于标量变数的微分	424
A1-2 标量场及矢量场	424
A1-3 标量场的导数	426
A1-4 矢量场的导数	428
A1-5 流动导数	431
A1-6 矢量函数的散度、旋度	433

A1-7	∇ 算子法则	434
A1-8	应用于不同函数的算子 ∇ 、 $\nabla \cdot$ 、 $\nabla \times$	434
A1-9	含有两次 ∇ 的运算	436
A 2	曲线坐标系	436
A2-1	概述.....	436
A2-2	正交曲线坐标系	439
A2-3	轴对称正交曲线坐标系.....	440
A2-4	圆柱坐标系	446
A2-5	正交坐标系中的散度、梯度、旋度	446
A2-6	轴对称正交曲线坐标系中的散度、梯度、旋度	450
A2-7	圆柱坐标系中的梯度、散度、旋度	452
附录 B		454
B 1	绝对粗糙度 Δ 与粗糙系数 n 的关系	454
B 2	金属管道的管壁绝对粗糙度 Δ 的值	455
B 3	非金属材料的管壁及槽壁的绝对粗糙度 Δ 的值	456
B 4	管壁粗糙系数 n 的值	456
B 5	光滑管中的摩阻系数 λ 值	457
B 6	按阿格罗斯金公式算得的阻力平方区内系数 λ 、 C 、 K 值 ...	458
B 7	计算水管过渡区的修正系数 θ_1 和 θ_2 的值	459
B 8	各种局部阻力系数及按正常水管算得的当量长度	460

第一篇 流体力学

第一章 流体的主要物理性质

第一节 流体的主要物理性质

一、流体

流体是一种连续介质。它的各个质点（微团）彼此之间有很大的流动性。流体质点由不断运动着的分子所构成。即使流体处于静止状态，这种分子运动也不会停止。除了流体内部分子力所引起的分子运动外，还由于外力作用使流体质点产生运动。这样，流体真正运动包括由于流体内部分子力所引起的内部分子运动以及由于外力作用所引起的流体质点的运动。流体内部分子运动在流体力学中不予考虑。流体力学只从宏观上去研究流体质点的运动。正是由于这个原因，流体力学中采用连续的流体介质作为流体的模型。这样，流体力学研究对象就是一种连续的流体介质。就是说以连续的流体介质来代替流体分子结构。因此，流体就是它各个质点之间具有很大的流动性的连续介质。

二、重度与密度

单位体积流体的重量叫流体重度。设流体的体积为 ΔV 米³，重量为 ΔG 牛，则该流体重度 γ 为：

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \text{牛/米}^3 \quad (1-1)$$

由于流体介质是连续的，故式（1-1）有极限存在。

单位体积流体的质量叫流体密度。设流体体积为 ΔV 米³，质量为 ΔM 公斤，则该流体密度 ρ 为：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-2)$$

公式 (1-1) 用公式 (1-2) 除之, 则得:

$$\frac{\gamma}{\rho} = \frac{\Delta G}{\Delta M} = g \text{ 米/秒}^2$$

或者:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度。

例 体积为60升的油箱装满了油。油的重量为500.43牛。求油的重度与密度。

解 根据公式 (1-1) 可得油的重度为:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{500.43}{0.06} = 8345 \text{ 牛/米}^3$$

根据公式 (1-3) 可得油的密度为:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{8345}{9.81} = 850.6 \text{ 公斤/米}^3$$

三、压缩性与膨胀性

流体的重度与密度随温度与压力的不同而发生变化。这就表现出流体有压缩性和膨胀的特性。一般对于气体, 这种变化较大些; 对于液体, 这种变化较小些。

当一定质量的流体由于压力温度的变化, 而使流体密度增大时, 则叫流体的压缩; 反之叫流体的膨胀。

在液压传动系统中, 液压油体积的变化有时可以忽略。但压力变化较大时, 液压油体积的变化就不能忽略。在体积变化不能忽略的情况下, 要考虑液压油重度与密度随温度与压力变化而发生的变化。

1. 流体重度与温度的关系

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{15}}{1 + \beta_t(t - 15)} \text{ 牛/米}^3 \quad (1-4)$$

式中 t —— 给定温度, $^{\circ}\text{C}$;

$\gamma_{15^{\circ}}$ —— 15°C 时流体重度, 牛/米³;

γ_t —— 给定温度 $t^{\circ}\text{C}$ 时流体重度, 牛/米³;

β_t —— 流体热膨胀系数, 对于液压油, $\beta_t = 0.00065/^{\circ}\text{C}$ 。

2. 流体密度与温度关系

$$\rho_t = \frac{\rho_{15^{\circ}}}{1 + \beta_t(t - 15)} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-5)$$

式中 $\rho_{15^{\circ}}$ —— 15°C 时流体密度, 公斤/米³;

ρ_t —— 给定温度 $t^{\circ}\text{C}$ 时流体密度, 公斤/米³。

3. 流体重度与压力关系

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 - \beta_p(p - p_0)} \text{ 牛/米}^3 \quad (1-6)$$

式中 p —— 给定压力, 牛/厘米²;

p_0 —— 初始压力, 牛/厘米²;

γ —— 给定压力 p 时的流体重度, 牛/米³;

γ_0 —— 初始压力 p_0 时的流体重度, 牛/米³;

β_p —— 流体体积压缩系数, 即单位体积压缩量 $\frac{dV}{V}$ 与作用于受压体积 V 的表面单位面积上的压力增加值 dp 之间的比例系数, 亦即:

$$\beta_p = -\frac{dV}{V dp}$$

对于液压油 $\beta_p = (5.1 \sim 7.1) \times 10^{-6}$, 厘米²/牛。

流体体积压缩系数 β_p 的倒数叫流体体积弹性系数 K , 即:

$$K = \frac{1}{\beta_p} = -V \frac{dp}{dV}$$

因为流体体积 V 中的流体质量 $\rho V = \text{常数}$, 故

$$d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

因而：

$$K = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \text{ 牛/厘米}^2 \quad (1-7)$$

对于液压油

$$K = 137340 \sim 196200 \text{ 牛/厘米}^2。$$

4. 流体密度与压力的关系

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \beta_p(p - p_0)} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-8)$$

式中 ρ —— 给定压力 p 时流体的密度；

ρ_0 —— 初始压力 p_0 时流体的密度。

当研究液体的静止与运动时，在大多数实际问题中，例如液体在泵内流动时，可以假定液体的密度 ρ 是不变的。这时我们把此种情况下的液体认为是不可压缩的。即使是气体，在压力变化较小的情况下，例如空气在通风机内流动时，可以假定空气的密度 ρ 也是不变的。这时我们把此种情况下的空气认为也是不可压缩的。即使是液体，例如液压系统中产生液力冲击时，液压油的密度 ρ 的变化就不能忽略。这时我们把此种情况下的液压油认为是可压缩的。因此，某种流体是属于可压缩的或属于不可压缩的要按具体情况进行分析。

气体与液体不同之处是当压力增加到一定值时，气体的压缩性明显地表现出来，并具有较高的温度膨胀系数。

当气体的绝对压力由 p_1 变到 p_2 、绝对温度由 T_1 变到 T_2 时，理想气体的重度 γ 、密度 ρ 、比容 v 的变化由下面理想气体状态方程式来确定：

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \quad (1-9)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \quad (1-10)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} \quad (1-11)$$

式中 γ_1 、 ρ_1 、 ν_1 ——分别为绝对压力 p_1 、绝对温度 T_1 时理想气体的重度、密度、比容；

γ_2 、 ρ_2 、 ν_2 ——分别为绝对压力 p_2 、绝对温度 T_2 时理想气体的重度、密度、比容。

流体的比容就是单位重量流体所占的体积。

在1标准大气压力下，不同温度时水和空气的重度与运动粘性系数数值列于表1-1中。在1标准大气压力下，某些液体在15°C时的重度与运动粘性系数数值列于表1-2中。

不同温度时水和空气的重度与运动粘性系数值 表 1-1

温度 t , °C	重度 γ , 牛/米 ³		运动粘性系数 ν , 厘米 ² /秒	
	水	空 气	水	空 气
0	9808.63	11.684	0.0178	0.137
4	9810.00	12.488	0.0156	0.141
10	9807.23	12.232	0.0131	0.147
15	9801.37	12.027	0.0114	0.152
20	9694.54	11.821	0.0101	0.157
30	9764.58	11.449	0.0080	0.166
40	9733.87	10.066	0.0066	0.176
60	9645.58	9.810	0.0045	0.196
80	9532.05	9.810	0.0035	0.217
100	9401.71	9.270	0.0027	0.238

某些液体在15°C时重度与粘性系数值 表 1-2

液 体 名 称	重度 γ , 牛/米 ³	运动粘性系数 ν , 厘米 ² /秒
汽油	6674~7063	0.0060~0.0065
酒精	7750	0.013~0.017
煤油	7750~8044	0.020~0.025
石油	8437	0.070~0.080
石油	8833	0.25~0.30
石油	8731	0.50~0.60
石油	8829	1.30~1.40
甘油	12361	8.70~11.60