

# 流体机械原理 与CAD演习



肖琬元 林志雄

华中理工大学出版社

本书内容:流体机械(水轮机、水泵、通风机、液压元件)的原理及其水力学基础,计算机辅助设计(CAD)在流体机械中的应用。并提供大量的例题和习题可供演习。

# 流体机械原理与CAD演习

肖琬元 林志雄

江苏工业学院图书馆  
藏书章

华中理工大学出版社

# 流体机械原理与CAD演习

肖琬元 · 林志雄

责任编辑 煜文

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：9.125字数：203 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数：1—1 000

ISBN 7-5609-0631-1/TH·52

定价：2.38元

(鄂) 新登字第10号

## 前 言

流体机械主要包括以泵和水轮机为代表的水力机械、以通风机和压缩机为代表的气体机械及以油为工作介质的液压元件和液体传动装置。它们有着共同的流体力学理论基础。

长期以来,我国工科院校专业设置面偏窄,仅流体机械方面就分别设置水力机械专业、风机压缩机专业、液压传动专业等。随着教学改革的不深入,目前已有些院校将上述专业改设置为流体机械专业。本书正是为适应教学改革的需要而编写的。

全书共分七章。书中对各种流体机械的原理以及它们共同的流体力学理论基础作了最简明扼要的叙述。同时,列举了大量的例题和解题方法,便于读者加深对理论的理解。书中每章(节)后均附有一定数量的练习题,并给出答案,以便于读者演习。书中还以相当大的篇幅,阐述流体机械计算机辅助设计的思路与步骤,并以离心泵、离心通风机和水轮机的主要零、部件为实例,给出CAD程序框图及相应的设计程序,以帮助广大读者尽快熟悉和掌握流体机械CAD这一先进技术。

本书的第一章至第六章由肖琬元编写,第七章由林志雄编写。

由于编者水平有限,错误及不当之处难免,恳请读者批评指正。

编 者

一九九一年四月

## 内 容 简 介

流体机械主要包括以泵和水轮机为代表的水力机械、以通风机和压缩机为代表的气体机械及以油为工作介质的液压元件和液体传动装置。本书对各种流体机械的原理及它们共同的流体力学理论基础作了最简明扼要的叙述。同时,列举大量例题和题解,便于读者加深对理论的理解。书中每章(节)后附有一定数量的练习题和答案,供读者演习。

本书还阐述应用CAD技术进行流体机械设计,并以泵、通风机、水轮机的主要部件设计为例,给出CAD程序框图,还附有设计程序。

本书可供各类工科学校(包括全日制大专院校、职大、电大和中专等)的流体机械各专业的师生使用,也可供从事流体机械各行业技术工作的工程技术人员参考。

# 目 录

<b>第一章 流体力学基础</b> .....	(1)
1.1 量和单位 .....	(1)
1.2 流体的物理性质 .....	(1)
练习题 .....	(10)
1.3 静力学基本方程 .....	(11)
练习题 .....	(18)
1.4 伯努利方程 .....	(19)
练习题 .....	(28)
1.5 动量方程 .....	(31)
练习题 .....	(38)
1.6 旋转运动基本方程 .....	(40)
练习题 .....	(47)
1.7 轴承润滑的压力梯度方程 .....	(48)
<b>第二章 流体机械概述</b> .....	(52)
2.1 流体机械的定义与分类 .....	(52)
2.2 流体机械的基本方程式 .....	(54)
2.3 流体机械的相似准则 .....	(61)
2.4 流体机械的比转数 .....	(69)
<b>第三章 水轮机</b> .....	(73)
3.1 水轮机的型式 .....	(73)
3.2 水轮机的水头、流量、效率和功率 .....	(74)
3.3 水轮机的速度三角形 .....	(79)
3.4 水轮机的汽蚀系数 .....	(83)

3.5 水轮机的吸出高度	(87)
3.6 改善轴流定桨式水轮机的运行特性	(91)
3.7 径流式电站水轮机选择	(94)
3.8 蓄能电站工程	(99)
练习题	(100)
<b>第四章 离心泵</b>	(102)
4.1 离心泵的理论扬程方程式	(103)
4.2 离心泵的特性曲线	(104)
4.3 汽蚀	(108)
4.4 离心泵叶轮的水力设计	(113)
4.5 离心泵叶轮的计算机辅助设计	(129)
练习题	(135)
<b>第五章 离心式通风机和压缩机</b>	(136)
5.1 概述	(136)
5.2 气体机械理论	(141)
5.3 效率与特性	(147)
5.4 离心通风机的设计	(150)
5.5 离心通风机计算机辅助设计	(171)
练习题	(181)
<b>第六章 液压元件</b>	(182)
6.1 液压传动装置的组成	(182)
6.2 液压传动的工作油	(182)
6.3 液压泵	(186)
练习题	(201)
6.4 蓄能器	(202)
练习题	(204)
6.5 液压控制阀	(205)
练习题	(212)
6.6 液压控制阀的静特性	(213)

练习题 .....	(225)
6·7 液压控制阀的动特性 .....	(225)
练习题 .....	(237)
<b>第七章 流体机械计算机辅助设计 .....</b>	<b>(238)</b>
7·1 概述 .....	(238)
7·2 金属蜗壳的水力设计 .....	(240)
7·3 混凝土蜗壳的水力设计 .....	(251)
7·4 轴流式转轮叶片设计(奇点法) .....	(267)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(282)</b>



# 第一章 流体力学基础

## 1.1 量和单位

60年代,在我国,流体力学和流体机械领域的各常用物理量所使用的计量单位有国际单位制(SI)——米·千克·秒制、工程单位制(MKS)——米·千克(力)·秒制和物理单位制(CGS)——厘米·克·秒制。这三种单位制并用,换算起来比较麻烦,已不适应现代科学技术发展的需要。1984年2月,国务院发布命令:我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。我国的法定计量单位(以下简称法定单位),是以国际单位制(SI)的单位为基础,根据我国的实际情况,适当增加了一些非国际单位制单位构成的。国家明确规定1990年年底以前,全国各行业应全面完成向法定计量单位的过渡。

现仅将流体力学和流体机械领域中常用的量和法定单位列表1.1。

## 1.2 流体的物理性质

### 1.2.1 密度、重度、比容和比重

单位体积流体所具有的质量称为密度,以 $\rho$ 表示:

$$\rho = m/V \quad \text{或} \quad \{\rho\}_{\text{kg/m}^3} = \{m\}_{\text{kg}} / \{V\}_{\text{m}^3} \quad (1.1)$$

式中:  $\rho$ ——流体的密度;

表1·1 流体力学中常用的量和法定单位

量的名称	符号	单位名称	符号	备 注
长 度	$l, (L)$	米	m	米是光在真空中(1/299 792 458) s时间间隔内所经路径的长度
质 量	$m$	千克(公斤)	kg	千克等于国际千克原器的质量
时 间	$t$	秒	s	
〔平面〕角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$ 等	度 弧度	(°) rad	$1^\circ = 0.017 453 3 \text{ rad}$
热力学温度	$T, \Theta$	开〔尔文〕	K	
摄氏温度	$t, \theta$	摄氏 度	℃	$t = T - T_0$ , 而 $T_0 = 273.15 \text{ K}$
面 积	$A, (S)$	平方米	$\text{m}^2$	
体积, 容积	$V$	立方米	$\text{m}^3$	$1\text{!} = 10^{-3} \text{ m}^3$
角 速 度	$\omega$	弧度每秒	rad/s	
速 度	$u, v, w, c$	米 每 秒	m/s	
加 速 度	$a$	米每二次方秒	$\text{m/s}^2$	标准重力加速度 $g_n = 9.806 65 \text{ m/s}^2$
密 度	$\rho$	千克每立方米	$\text{kg/m}^3$	
动 量	$P$	千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$	
动量矩, 角动量	$L$	千克二次方米 每秒	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	
力	$F$	牛〔顿〕	N	加在质量为1kg的物体上使之产生 $1 \text{ m/s}^2$ 加速度的力为1N, 即 $1 \text{ N} = 1 \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
重 力	$W, (P, G)$	牛〔顿〕	N	( $1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$ )
压力, 压强	$p$	帕〔斯卡〕	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
〔动力〕粘度	$\eta, (\mu)$	帕〔斯卡〕秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$
运动粘度	$\nu$	二次方米每秒	$\text{m}^2/\text{s}$	
功	$W, (A)$	焦〔耳〕	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
能〔量〕	$E, (W)$	焦〔耳〕	J	
功 率	$P$	瓦〔特〕	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$ $= 1.36 \times 10^{-3} \text{ h.p.}$
体积流量	$qv$	立方米每秒	$\text{m}^3/\text{s}$	$1 \text{ m}^3/\text{s} = 1000 \text{ l/s}$

$m$ ——体积为 $V$ 的流体质量；

$V$ ——质量为 $m$ 的流体体积。

单位体积流体所具有的重量称为重度，以 $\gamma$ 表示：

$$\gamma = G/V \quad \text{或} \quad \{\gamma\}_{\text{N/m}^3} = \{G\}_{\text{N}} / \{V\}_{\text{m}^3} \quad (1.2)$$

式中： $\gamma$ ——流体的重度；

$G$ ——流体的重量。

在一个标准大气压和 $4^\circ\text{C}$ 时，蒸馏水的重度 $\gamma = 9810\text{N/m}^3$ 。

单位质量流体所具有的体积称为比容，以 $v$ 表示：

$$v = V/m \quad \text{或} \quad \{v\}_{\text{m}^3/\text{kg}} = \{V\}_{\text{m}^3} / \{m\}_{\text{kg}} \quad (1.3)$$

式中： $v$ ——流体的比容（比体积）。

流体的比重 $s$ 是指其重量与等体积蒸馏水（ $4^\circ\text{C}$ 时）重量的比值，或指流体的密度与蒸馏水（ $4^\circ\text{C}$ 时）密度的比值。比重是无量纲的量。

例题1.1 设 $5.6\text{m}^3$ 的油重 $46800\text{N}$ ，试计算这种油的密度和比重。

解 据题意知：

$$\text{油的重度} \quad \gamma = \frac{G}{V} = \frac{46800\text{N}}{5.6\text{m}^3} = 8360\text{N/m}^3$$

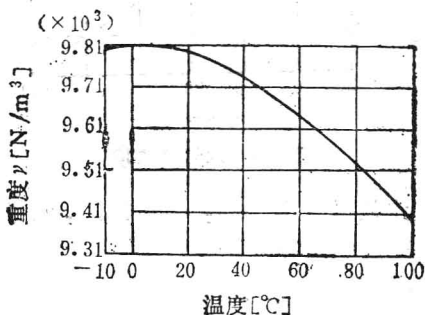


图1.1 水的重度

油的密度  $\rho = \gamma/g = \frac{8360\text{N/m}^3}{9.81\text{m/s}^2}$   
 $= 852\text{kg/m}^3$

故, 油的比重  $s = \rho/\rho_w = \frac{852\text{kg/m}^3}{1000\text{kg/m}^3} = 0.852$

水、空气及水银的重度分别示于图1.1~1.3。

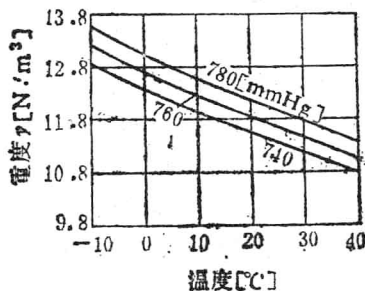


图1.2 干燥空气的重度

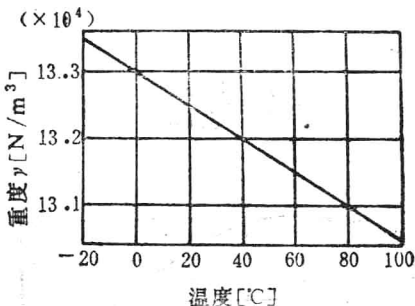


图1.3 水银的重度

例题1.2 水银的比重为 $s_{\text{Hg}} = 13.56$ 时, 水银的重度 $\gamma_{\text{Hg}}$ 、  
 比容 $v_{\text{Hg}}$ 及密度 $\rho_{\text{Hg}}$ 是多少?

解 根据比重 $s$ 的定义, 可得

$$\gamma_{\text{Hg}} = s_{\text{Hg}} \cdot \gamma_w = 13.56 \times 9810\text{N/m}^3 = 13.3 \times 10^4\text{N/m}^3$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{g} = \frac{13.3 \times 10^4 \text{ N/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} = 1.356 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 1/\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1/(1.356 \times 10^4 \text{ kg/m}^3) = 7.37 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$$

**例题1.3** 求证干燥空气的重度用下式计算:

$$\{\gamma\}_{\text{N/m}^3} = 4.55\{H\}_{\text{mm}}/\{T\}_{\text{K}}$$

式中:  $H$ ——水银柱的高度,

$T$ ——绝对温度,

$\gamma_0$ ——空气在 $0^\circ\text{C}$ 时的重度, 且 $\gamma_0 = 12.68 \text{ N/m}^3$ 。

解 气体状态方程式为  $p/\gamma = RT$ 。取  $p_0/\gamma_0 = RT_0$  与  $p/\gamma = RT$  的比, 整理后得

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} = 12.68 \text{ N/m}^3 \times \frac{273 \text{ K}}{T(\text{K})} \times \frac{H(\text{mm})}{760 \text{ mm}} \\ &= 4.55 \frac{H(\text{mm})}{T(\text{K})} \text{ N/m}^3 \end{aligned}$$

即 
$$\{\gamma\}_{\text{N/m}^3} = 4.55\{H\}_{\text{mm}}/\{T\}_{\text{K}}$$

### 1.2.2 压缩率 $\kappa$

假设使体积为 $V_0$  ( $\text{m}^3$ ) 的液体在压力变化为 $dp$  ( $\text{N/m}^2$ ) 时发生的体积变化为 $dV$  ( $\text{m}^3$ ) 则其压缩率 $\kappa$ 表示如下:

$$\kappa = -\frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (\text{单位: Pa}^{-1} \text{ 或 } \text{m}^2/\text{N}) \quad (1.4)$$

压缩率的倒数叫做流体的体积弹性系数。即

$$\beta = \frac{1}{\kappa} \quad (\text{单位: N/m}^2) \quad (1.5)$$

表1.2列出了部分流体的压缩率。

**例题1.4** 要增加多大的压力才能使水的体积减小1%? 水的体积弹性系数为 $2.07 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。

解 根据式(1.4)可得压力增量 $\Delta p$ 为

$$\Delta p = -\frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\kappa}$$

$$= -(-1\%) \times 2.07 \times 10^9 \text{ N/m}^2 = 2.07 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

表1·2 流体的压缩率

物质名称	压缩温度 (°C)	压力范围 ( $\times 10^4 \text{ N/m}^2$ )	压缩率 $\kappa$ ( $\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ )
食盐水(5%)	25	1~500	3.9
水银	20	1~500	0.40
甘油	15	1~10	2.26
乙醇	20	1~500	8.4
甲醇	20	1~500	8.3
苯	20	100~300	7.8
橄榄油	20	1~10	6

### 1·2·3 表面张力

液体的自由表面层内的分子之间存在不平衡的引力，称这种不平衡的引力为表面张力，用 $\sigma$ 来表示。 $\sigma$ 的大小等于液体自由表面的单位线性长度上的作用力。

设在液体自由表面上任意取一线性长度 $\Delta l$ ，其上作用的力为 $\Delta F$ ，则表面张力 $\sigma$ 为

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad (1\cdot6)$$

表面张力的单位为N/m。

表面张力 $\sigma$ 的值与液体的种类和温度有关，可用实验测定。表1·3示出了各种液体表面张力 $\sigma$ 的值。

表1·3 液体的表面张力(20°C时)

液体	酒精	甘油	水	10%食盐水	水银	水银
接触介质	空气	空气	空气	空气	空气	水
$\sigma(\text{N/m})$	$2.24 \times 10^{-2}$	$3.13 \times 10^{-2}$	$7.26 \times 10^{-2}$	$7.39 \times 10^{-2}$	$4.67 \times 10^{-1}$	$3.66 \times 10^{-1}$

**例题1.5** 求与曲率半径 $r_1$ 、 $r_2$ 垂直的流面的内外压力差。

解 如图1.4所示, 由于作用在液面微元面积 $dA = ds_1 ds_2$ 上的力在法线方向是平衡的, 故得

$$\begin{aligned} \Delta p dA &= \Delta p ds_1 ds_2 = 2 \left[ \left( \sigma \sin \frac{\theta'}{2} \right) ds_1 + \left( \sigma \sin \frac{\theta}{2} \right) ds_2 \right] \\ &= 2\sigma \left( \frac{\theta'}{2} ds_1 + \frac{\theta}{2} ds_2 \right) \end{aligned}$$

由图1.4的几何关系知,  $ds_1 = r_1 \theta$ ,  $ds_2 = r_2 \theta'$ , 代入上式后得

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.7)$$

如果液面是球面时,  $r_1 = r_2 = r$ , 式(1.7)可改写为

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (1.8)$$

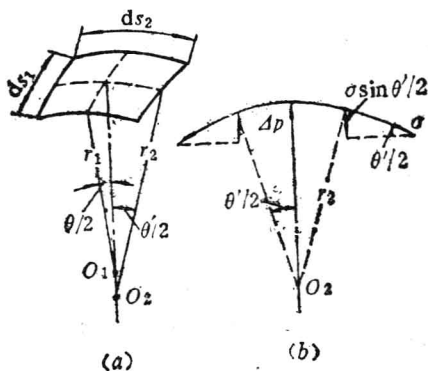


图1.4 液面微元面积

**例题1.6** 竖立在水中的直径为 $d = 0.1\text{mm}$ 的玻璃管, 水会上升多少? 假定接触角 $\alpha = 9^\circ$ , 表面张力 $\sigma = 7.26 \times 10^{-2} \text{N/m}$ 。

解 如图1.5所示, 由于表面张力使管内的水位上升, 上升的水柱重量与表面张力的垂直分量相平衡, 即

$$\pi d(\sigma \cos \alpha) = \gamma(\pi d^2/4)h,$$

$$h = \frac{4\sigma \cos \alpha}{\gamma d}$$

∴  
因此

$$\begin{aligned} h &= \frac{4 \times 7.26 \times 10^{-2} \text{ N/m} \times \cos 9^\circ}{9810 \text{ N/m}^3 \times 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}} \\ &= 2.92 \times 10^{-1} \text{ m} = 29.2 \text{ cm} \end{aligned}$$

在这种细管中液体上升（或下降）的现象称为毛细管现象。

象。

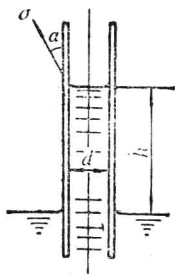


图1·5 毛细管现象

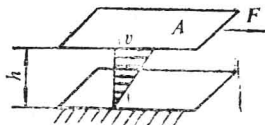


图1·6 充满液体的两平行平板

#### 1·2·4 粘度

实际流体相互之间作相对运动时会产生阻力，流体的这种性质称为粘性。

如图1·6所示，平行的两平板间充满了液体。若一方固定，另一方以速度 $v$ 运动时，必须加力 $F$ 。设板的面积为 $A$ ，两板间的距离为 $h$ ，那么， $F$ 与 $\frac{Av}{h}$ 成正比，这个比例常数就是 $\mu$ 。

即：

$$F = \mu \frac{Av}{h} \quad \text{或} \quad \tau = \mu \frac{v}{h} \quad (1.9)$$

把 $\mu$ 称为粘度或粘性系数，而 $\tau = \frac{F}{A}$ 为单位面积上的内摩擦力。



速度沿高 $h$ 的分布 $v/h$ 非直线时,如图1.7所示,可取微小间距 $dy$ 的速度差为 $dv$ ,则 $\tau$ 可表示为

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.10)$$

图1.8是水、水银和空气的粘性系数随温度变化的曲线。如图所示,液体的粘性系数随温度的上升而减小,而空气的粘性系数则随温度的上升而增大。这种现象将在1.7节中加以说明。

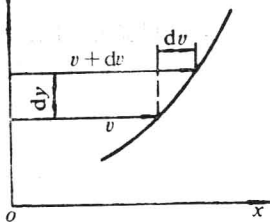


图1.7 速度分布曲线

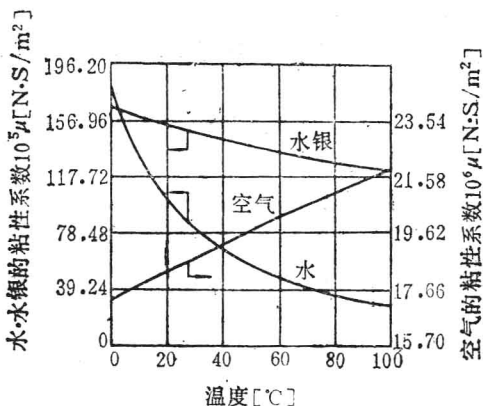


图1.8 水·水银及空气的粘性系数

把 $\nu = \mu/\rho$ 称为运动粘度或粘性运动系数。

粘性系数 $\mu$ 的单位为帕·秒(Pa·s)或牛顿·秒/米<sup>2</sup>(N·s/m<sup>2</sup>)。

运动粘性系数 $\nu$ 的单位为米<sup>2</sup>/秒(m<sup>2</sup>/s)或斯托(St),且1St = 1cm<sup>2</sup>/s。

**例题1.7** 已知某种油的运动粘度为40cSt,其比重 $s$ 为0.87,求这种油的粘性系数 $\mu$ 。

**解** 据题意知,油的密度 $\rho$ 为