

流体机械工程例题集

〔日〕前田照行 著

李昌琪 译 陈楚琳 校



国防工业出版社

流体机械工程例题集

〔日〕 前田照行 著

李昌琪 译

陈楚琳 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书以例题的形式阐述有关流体机械工程的基本理论及其设计计算方法。全书共五章：一、水力学基础；二、涡轮式流体机械；三、容积式流体机械；四、液压机械；五、液力传动装置。为了便于读者阅读，在每一节的开始都扼要地介绍有关的基本理论、定理和计算公式，然后利用大量的例题加以说明，在各章的末尾均附有一定数量的习题和答案。

本书可作为高等院校液压及流体机械类专业的教学参考书，也可供从事流体机械设计、研究的工程技术人员参考。

流体机械工程演习

前田照行 著

李献社

流体机械工程例题集

〔日〕前田照行 著

李昌琪 译

陈慕琳 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 $1/32$ 印张 $9\frac{3}{8}$ 205千字

1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷 印数：0,001—3,600册

ISBN 7-118-00148-1/T1 定价：2.55元

译者的话

本书是根据日本出版的“《流体机械工学演習》第二版(1982年)翻译的。作者通过大量的工程实践中的例题与习题来阐述有关流体机械工程的基本理论,读者通过这些例题与习题不仅能加深对本门课程内容的理解,而且对培养分析问题、理论联系实际的能力颇有价值。全书结构严谨,基本概念简明扼要,并全面地给出了基本的定理和计算公式,与我国同类书比较,本书内容更加全面、丰富,因而适用范围更大。

由于译者水平有限,译文中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

序 言

所谓流体机械包括以泵和水轮机为代表的水力机械，以鼓风机和压缩机为代表的空气机械以及用油作为介质的液压机械和液力传动装置等，其种类多种多样。流体机械是一门比较新的学科，有关这个学科的例题与习题汇编书籍似乎还不太多。

本书是为了加深对大学、短训班、工科大学专科等流体机械课程的理解而写成的一本通俗易懂的例题与习题汇编书籍。因此，在各节的基础部分列举了许多例题，目的是想在学会这些例题的同时，通过具体问题，能掌握其应用。尽管本书是一本流体机械的例题与习题汇编，但在第一章中仍涉及了有关水力学的一般理论，其目的是帮助理解流体机械中使用的各种公式，同时也试图把它作为一本水力学的例题与习题汇编书籍。

作者是专门研究流体机械这门学科的，由于才疏学浅，阐述不清或谬误之处在所难免，敬请广大读者予以批评指正。

在此对于给予作者写作本书机会的成蹊大学教授樋田昭先生和学献社的横井川彰先生表示深切的谢意。

作 者

1980年8月

目 录

第 1 章 水力学基础	1
1.1 单位	1
1.2 流体的物理性质	2
1.3 压力	10
1.3.1 静压力	10
1.3.2 压力中心	15
1.3.3 浮力	17
1.4 水动力学	20
1.4.1 流线与流管	20
1.4.2 连续性方程式	21
1.4.3 伯努利方程式	22
1.4.4 伯努利方程式的应用例子	25
1.5 动量理论 (之一)	34
1.5.1 动量公式	34
1.5.2 管路截面积突然变化时的损失	39
1.5.3 扩散管	42
1.6 涡流运动	46
1.6.1 涡流运动的基本方程式	46
1.6.2 强制涡流	46
1.6.3 自由涡流	48
1.6.4 环量	51
1.7 粘性流体	54
1.7.1 层流与紊流	54
1.7.2 圆管内的层流	57
1.7.3 管摩擦阻力系数	60
1.7.4 各种阀的阻力	63
1.8 润滑理论	66
1.8.1 米切尔推力轴承的理论	66
1.9 相似法则	69

1.9.1 流体工程中常用的相似法则	70
1.9.2 Π 定理	72
1.10 压缩性流体	79
1.10.1 喷嘴	79
1.10.2 收敛喷嘴	84
第2章 涡轮式流体机械	85
2.1 基础理论(欧拉扬程方程式)	86
2.2 离心泵	89
2.2.1 离心泵的理论扬程方程式	89
2.2.2 比转速	91
2.2.3 比转速与叶轮的形状	92
2.2.4 离心泵的结构	93
2.2.5 泵的特性	95
2.2.6 空穴现象	98
2.2.7 离心泵的设计	104
2.3 离心鼓风机, 压缩机	130
2.3.1 概述	130
2.3.2 空气机械的理论	135
2.3.3 效率与特性	141
2.3.4 离心鼓风机的设计	145
2.4 混流泵, 轴流泵与鼓风机	169
2.5 水轮机	173
2.5.1 水轮机的形式	173
2.5.2 水轮机的落差、功率、效率	176
2.5.3 比转速	178
2.5.4 皮尔顿水轮机	180
2.5.5 法兰西斯式水轮机	182
2.5.6 螺旋桨式水轮机	183
2.5.7 泵水轮机	184
第3章 容积式流体机械	188
3.1 往复式泵	188
3.2 往复式压缩机	193
3.3 罗茨鼓风机、罗茨流量计	197

第4章 液压机械	202
4.1 概述	202
4.1.1 动力传递方法的沿革	202
4.1.2 液压的优点与缺点	202
4.1.3 液压机械的发展方向	203
4.2 液压油	204
4.2.1 液压油的性质	204
4.2.2 油的物理性质	206
4.3 油泵	210
4.3.1 油泵的种类	210
4.3.2 齿轮泵	211
4.3.3 叶片泵	213
4.3.4 轴向柱塞泵	216
4.3.5 摆线泵	221
4.3.6 蓄能器	221
4.4 液压控制阀	227
4.4.1 方向控制阀	227
4.4.2 压力控制阀	229
4.4.3 流量控制阀	235
4.5 液压控制阀的静特性	236
4.5.1 方向控制阀的流量特性	236
4.5.2 压力平衡式溢流阀的特性	241
4.5.3 压力补偿式流量控制阀的流量特性	243
4.5.4 液压卡紧	245
4.6 液压控制阀的动特性	251
4.6.1 动量定理(之二)	251
4.6.2 滑阀的动特性	252
4.6.3 锥阀的动特性	258
4.6.4 液压激振器	264
4.7 液压控制回路	268
4.7.1 自动控制方式	268
4.7.2 用方框图表示控制回路	268
4.7.3 各种液压回路	275

VIII

第 5 章 液力传动装置	281
5.1 液力偶合器	281
5.2 液力变矩器	286

第 1 章 水力学基础

1.1 单 位

力学中使用的单位有 CGS 制和重力单位制。前者长度以厘米，质量以克，时间以秒为基本单位；后者长度以米，力以公斤力，时间以秒为基本单位。在日本也采用国际单位制 (SI 制)，可以想象，国际单位制的使用将会逐步得到推广。但是，在本书中，我们仍按惯例，采用重力单位制。为了便于参考，在表 1.1 中列出了各种单位制的对照表。

表 1.1 各种单位制对照表 (黑体字是基本单位)

	CGS 制	重 力 制	SI 制
长度 (L)	cm (厘米)	m (米)	m (米)
质量 (M)	g (克)	kgf·s ² /m	kg (千克)
时间 (T)	s (秒)	s (秒)	s (秒)
力 (F)	dyn (达因)	kgf (公斤力)	N (牛顿)
加速度 (α)	Gal (伽利略)	m/s ²	m/s ²
压力 (P)	dyn/cm ²	kgf/m ²	Pa (帕斯卡)
能量 (E)	erg (尔格)	kgf·m	J (焦耳)

注：标准重力加速度 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$, $\text{Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$, $\text{Pa} = \text{N/m}^2$, $1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$ 。

(1) 力

重力单位：1kgf = 使质量为 1kg 的物体获得重力加速度 g 时的力

国际单位：1N = 对质量为 1kg 的物体使产生 1 m/s^2 的加速度所需要的力 $= 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ kgm/s}^2$

〔注〕由于质量 kg 与力 kg 容易混淆, 工程上用公斤力 (kgf 或 kgW) 表示力。

(2) 质量

$$\text{质量}(M) = \frac{\text{重量}}{\text{重力加速度}} \left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \right)$$

(3) 密度

$$\text{密度}(\rho) = \frac{\text{质量}}{\text{单位体积}} \left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \right)$$

(4) 重度

$$\text{重度}(\gamma = \rho g) = \frac{\text{重量}}{\text{单位体积}} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \right)$$

(5) 压力

$$\text{压力}(p) = \frac{\text{力}}{\text{单位面积}} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \right)$$

1.2 流体的物理性质

(a) 重度 图 1.1 至图 1.3 所示分别为水、空气与水银的重度。表 1.2 列出了油的重度。

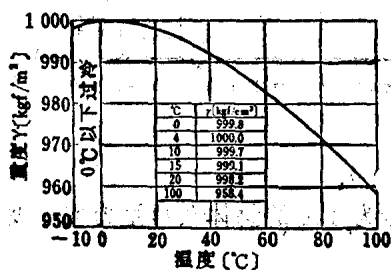


图1.1 水的重度 (标准大气压为1.0332kgf/cm²)

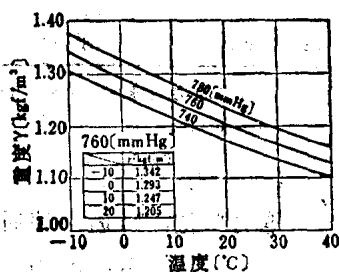


图1.2 干燥空气的重度

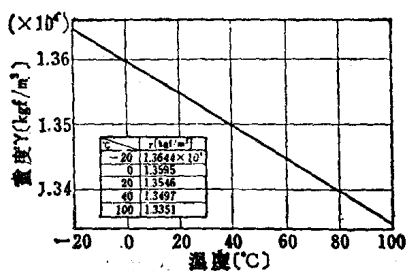


图1.3 水银的重量

表1.2 油的重量

	γ (kgf/m³) (15°C)
柴油	857
主轴油	912
机器油	911
气缸油	969

〔例题1.1〕 水银的比重为13.56时,试求水银的重量,比容和密度。

〔解〕 某种物质的比重 S 与其重量 γ 和水的重量 γ_w (4°C, 1 大气压)之间的关系为

$$S = \frac{\gamma}{\gamma_w}$$

因此,

$$\begin{aligned}\gamma_{Hg} &= S_{Hg} \gamma_w = 13.56 \times (1.00 \times 10^3) \text{ kgf/m}^3 \\ &= 1.356 \times 10^4 \text{ kgf/m}^3\end{aligned}$$

$$v_{Hg} = \frac{1}{\gamma_{Hg}} = 7.375 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kgf}$$

$$\rho_{Hg} = \frac{\gamma_{Hg}}{g} = \frac{1.356 \times 10^4 \text{ kgf/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} = 1.382 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

〔例题1.2〕 试证明干燥空气的重量可以表示为

$$\gamma = 0.464 \frac{H}{T}$$

式中 H ——水银柱的高度 (mm),

T ——绝对温度,

$r_0 = 1.293 \text{ kgf/m}^3$ (0°C时的值)。

〔解〕 由气体状态方程式 $p/\gamma = RT$, 可得 $p_0/\gamma_0 = RT_0$ 与

$p/\gamma = RT$ 之比为

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} = 1.293 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{H}{760} \text{ (kgf/m}^3\text{)} \\ &= 0.464 \frac{H}{T} \text{ (kgf/m}^3\text{)} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

(b) 压缩系数 (体积弹性系数) 将体积为 V_0 、压力为 p_0 的流体压缩时, 体积变为 $V_0 - \Delta V$, 压力变为 $p_0 + \Delta p$ 。这时, 用

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{\Delta p} \text{ (m}^3\text{/kgf)} \quad (1.2)$$

定义的 β 称为压缩系数。 β 的倒数

$$K = 1/\beta \text{ (kgf/m}^2\text{)} \quad (1.3)$$

称为体积弹性系数。液体的体积弹性系数列于表1.3。

表1.3 液体的体积弹性系数

	温度 (°C)	压力 (kgf/cm ²)	K (kgf/m ²)
水	20	1~25	2.11×10^8
石油	20	1	1.90×10^8
酒精	14	9~38	0.99×10^8
水银	20	1~100	2.54×10^9

〔例题1.3〕 试问应增加多大的压力方能使水的体积减小1%? (水的体积弹性系数 $K = 2.11 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$)

〔解〕 根据压缩系数的定义式 (1.2), 压力的增加量 Δp 为

$$\Delta p = -\frac{\Delta V}{V_0} \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta V}{V_0} K = -\left(-\frac{1}{100}\right) \times 2.11 \times 10^8$$

$$\text{kgf/m}^2 = 2.11 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2 = 2.11 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$$

(c) 表面张力 液体的自由表面经常由于液体内部分子的吸引力作用而收缩。这个力称为表面张力。

表面张力的大小 σ ，可以用作用在从液面引出的任意曲线线段 Δs 上的力 ΔF 与 Δs 之比表示，即

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta s} (\text{kgf/m})$$

σ 的值随与液体接触的物体和温度的不同而不同。

表1.4表示各种液体的表面张力值。表1.5表示液体与固体壁面的接触角。

表1.4 液体的表面张力 (20°C)

液 体	接触物体	σ (kgf/m)
酒精	空气	0.228×10^{-2}
橄榄油	空气	0.320×10^{-2}
水	空气	0.740×10^{-2}
10%食盐水	空气	0.754×10^{-2}
水银	空气	4.76×10^{-2}
水银	水	3.73×10^{-2}

表1.5 液体与玻璃间的接触角



种类	酒 精	苯	水	水 银
接触角 (θ°)	0	0	8 ~ 9	130 ~ 150

〔例题1.4〕 试求互相垂直的曲率半径分别为 r_1, r_2 的液面内外压力差 Δp 。

〔解〕 由于表面张力的作用，液面收缩的结果使液面内部的压力要比外部高。

现在，考虑作用在液面微小面积 $ds_1 \cdot ds_2$ 上的力（见图1.4）在法线方向的平衡

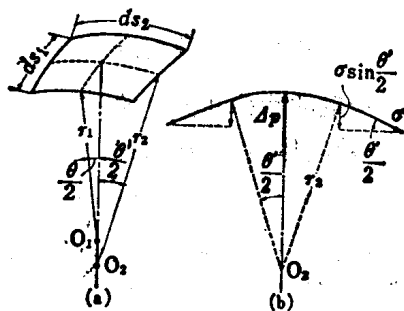


图1.4 液面的微小面积

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

式中，因为 $ds_1 = r_1 \theta$ ， $ds_2 = r_2 \theta'$ ，由上式消去 θ 和 θ' ，可得

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.4)$$

若液面为球面，则 $r_1 = r_2 = r$ ，则上式为

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (1.5)$$

〔例题1.5〕 在水中插入内径 $d = 0.1 \text{ mm}$ 的玻璃管，试求水上升的高度（接触角 $\alpha = 9^\circ$ ，表面张力 $\sigma = 0.740 \times 10^{-3}$

(kgf/m)。

〔解〕 如图1.5所示, 由于表面张力的作用, 管内水上升, 由上升水柱的重量与表面张力的垂直分力的平衡, 则得

$$\pi d(\sigma \cos \alpha) = \gamma \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) h$$

$$\therefore h = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{\gamma \alpha} \quad (1.6)$$

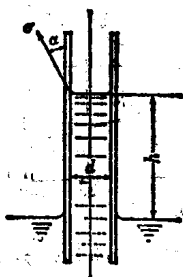


图1.5 毛细管现象

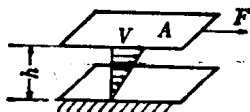


图1.6 流体在两平行平板间的流动

因此

$$h = \frac{4 \times 0.740 \times 10^{-2} \text{ kgf/m} \times 0.988}{10^3 \text{ kgf/m}^3 \times 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.92 \times 10^{-1} \text{ m} \\ = 29.2 \text{ cm}$$

液体在细管中上升(或下降)的现象称为毛细管现象。

(d) 粘度 在实际流体中, 如果相邻流体层间发生相对运动, 则产生内摩擦力。流体的这种性质称为粘性。

如图1.6所示, 当两块平行平板间充满流体时, 若一板固定, 另一板以速度 V 移动所需要的力 F 可用 $F \propto (AV/h)$ 表示, A 为平板的面积, h 为两平板间的间隙。取比例常数为 μ , 则可表示为

$$F = \mu \frac{AV}{h} \quad \text{或} \quad \frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{V}{h} \quad (1.7)$$

μ 称为粘度或粘性系数。

当运动速度按曲线规律分布, 如图1.7所示时, 速度梯度 V/h 应改用微小间隙 dy 的速度差 dv 表示的速度梯度 dv/dy , 即

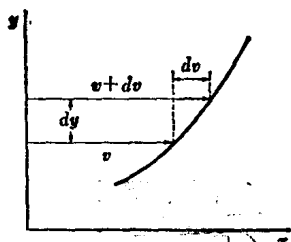


图1.7 速度呈曲线分布

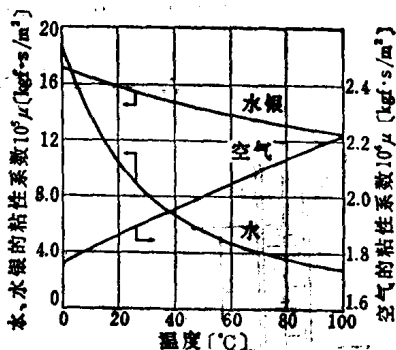


图1.8 水、水银与空气的粘性系数

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.7)'$$

图1.8所示是水、水银与空气的粘性系数与温度的关系曲线。由图可以看出, 液体的粘性系数随温度升高而降低, 而气体的粘性系数则增大。在1.7节中将说明其理由。

$\nu = \mu/\rho$ 称为运动粘度或运动粘性系数。

(i) 粘性系数的因次

$$[\mu] = \left[\frac{Fh}{AV} \right] = \left[\frac{FL}{L^2(L/T)} \right] = [FL^{-1}T] \quad (1.8)$$

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \left[\frac{\mu}{\gamma/g} \right] = \left[\frac{FL^{-1}T}{FL^{-3}(LT^{-2})^{-1}} \right] = [L^2T^{-1}] \quad (1.9)$$

(ii) 粘性系数的单位

$$\mu: 1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = 1 \text{ 泊 (P)},$$