

SOLUTION OF PROBLEMS
IN FLUID MECHANICS

流体力学题解

陈赵斯(英)
家文思 J. F. 道格拉斯著
扬谦源
校审译

成都科技大学出版社

流体力学题解



成都科技大学出版社

流体力学题解

[英] J. F. 道格拉斯 著 靳思源 译
赵文谦 审 陈家扬 校

成都科学技术大学出版社出版

四川省新华书店经销

电子科技大学印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 9.4375 字数 235 千字

1990 年 8 月第 1 版 1990 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—1200 册

ISBN7-5616-0399-1/O·37

定价：4.20 元

第一版序言

有些学生觉得难以学的教科书，这是由于他们总是象看小说那样来读书，缺乏明确认识每一段的出发点和仔细地研究每一步数学推导，在他读完之后，还自喜地觉得已经全部懂得，而事实上，没有理解其主题是什么？为了避免这种不理想的结果。作者编写的这本书仍采用问答的形式编写。

本书完全是一本教科书，而不是计算各种例题的书。从书的内容上读者就会发现我们所给出的定义和定理，都是用问答的方式说明的，所选的习题都有答案相配合，而收集的许多问答题也是为了考查对各一段的理解，本书包括的内容是为工学士级第一册教程和获得全国高级证书(Higher National Certificate)第一年教程相适应，而更高级的内容，则都在第二册阐述。

本人特别感谢伦敦大学评议会，土木工程师学会和力学工程师学会，他们均允许取用他们的测试资料。我也非常感谢SW Essex技术学院的院长和主管部门，我是在那里开始编写工作的。感谢区工艺学校的校长及主管单位，我在该校完成本书并得到他们的帮助支持，并允许复制他们的测验资料，在我的正常工作中为本书提供了很多例题。

在任何课本中，尽管作者、印刷部门以及出版部门都希望尽可能地把工作做好，但缺点和错误仍然是不可避免的，为此我感到极为抱歉，并高兴地接收任何指正或建设性批评。

J.F. DOUGLAS

1961年7月

全米制版序

四年前，在准备用米制版时，就决定还是留一些英制单位的练习。主要是为了方便那些仍习惯用英制单位的人，从那时以后，许多学校已知全部改成了用米制单位。因此，出版全米制版也势在必行，并且乘这次出版的机会，对某些个别地方作了适当的修改，还增添了少量的习题。

J.F.DOUGLAS

1974年5月

序 言

在流体力学中，把单位改成米制基本上不存在什么困难，因为各种习题的代数解并不会改变在牛顿第二定律基础上建立起来的所有单位制的内在联系，然而还是需要熟悉米制中采用的单位，其进行方式则如前述。在实际应用中，基本单位的复合单位以及衍生出来的单位可能比基本单位更常用且更方便得多。例如，压强的单位经过选择可以用巴斯或百万巴斯，又可用每平方米千牛顿。如果在代入代数的公式以前，其值用标准的米制单位表明这是没有困难的。

由于单位更换成国际单位制将延续若干年，并且不可能在各地都立刻取消古老的纯英制〔英呎·磅·秒制〕和工程单位〔英呎斯拉格制〕。因此在准备这一版所采取的主导思想是想把全部例题都用国际单位，原来的练习约有三分之一仍保留了英制单位，由于从许多试题中收集的题目，其值用国际单位表示的情况是很少的，因此就需要把这些题目从以前的资料中加以变换，要求选择合理的米制的值，而不是只做直接的转换，在以后的版本中，打算收集更多的较好的试题，如果这些试题对我们是有用的话。

我希望这本新修订的版本将同以前的版本一样是会受到欢迎的，请把你提出的问题、纠正的错误以及建设性批评寄给本人。

J.F. DOUGLAS

1969年12月

目 录

第一版序言

全米制版序

序 言

绪 论	(1)
第一章 静压力和水头	(11)
第二章 作用在表面上的静水压力	(30)
第三章 浮力和浮体的稳定性	(53)
第四章 静止的液体	(71)
第五章 流动的液体	(83)
第六章 水流测量——文丘里管流量计和毕托管	(100)
第七章 水流测量——大小孔口出流	(117)
第八章 水流测量——槽和堰	(134)
第九章 射流作用力	(148)
第十章 管道中的能量损失	(178)
第十一章 管道问题	(193)
第十二章 管道功率问题	(217)
第十三章 流体摩阻、粘滞性和润滑轴承	(230)
第十四章 变水头出流	(244)
第十五章 明渠均匀流	(262)

绪论

流体力学是一门包含液体与气体的静力学和动力学的应用力学。在流体力学中所用的动量和能量等都与一般力学中所采用的概念是相同的。但通常的流体力学是讨论流体流动而不是单个物体和质点。

水力学(取自希腊语“水”)是专门研究水流和蓄水问题的,但它常应用到其它液体上。例如“水力”控制装置常常是用油来作为工作流体。

液体是不能长久抵抗任何引起形状改变的力,流体在自身重力作用下会产生流动,其形状取决于与它接触的任何固体形状。

剪应力会引起形状的改变。因此,如果有剪应力作用在流体上,流体就会流动。反之,如流体处于静止状态,则无剪力产生。且所有力都是垂直于它所作用的平面。

流体可以分为液体和气体,液体是不容易压缩的,任意给定的液体不论盛它的容器的尺寸如何都占有固定的体积。在液体和它上面的空气之间形成的边界是液体的“自由表面”。而气体易于压缩,它在充满盛它的任何容气中发生膨胀,但它不能形成自由表面。

固体与流体的区别是:(1)在弹性极限内固体变形的规律是应变与应力成比例。而对于液体来说,应变的比率与应力成比例;(2)固体应变与力作用的时间无关,并且如果变形没有超过弹性极限,应力取走而变形消失。但是,流体只要施加应力作用,就会连续连动。当应力拿走时,流动不恢复原状。

单位和量綱

国际单位制

现在联合国采用所谓国际单位制的米制单位，在往后的教本中都将把老不列颠单位，如磅(pound)、磅达(poundal)和英尺(foot)均换成国际单位制，使成为唯一合法的量度系统。

国际单位制有六个专门定义的基本单位，即：

长度：米(m)

电流：安培(A)

质量：公斤(kg)

绝对温度：开尔文(K)

时间：秒(s 或 sec)

发光强度：堪得拉(cd)

所有的其它单位都可由这些基本单位导出。因为国际单位制是一种有内在联系单位制，在它们内的任两个单位的积或商，均是组合量单位。例如：距离的单位米除上时间单位秒可得到速度单位，即每秒米。如果在牛顿第二定律中把比例常数作为单位1，就可建立质量和力的关系。即

$$\text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$$

力的单位就是质量单位(公斤)和加速度单位(米/秒²)之积，即公斤-米/秒²，这就是所谓的牛顿。

其它单位制

如果把国际单位制作为一个参考单位制，就有其它单位制，并且这些单位制在世界不同的区域和一些特别活动场合仍然是重要的。英尺-磅-秒制(fps)、厘米-克-秒制(cgs)和米-公斤-秒制(MKS)现在已是广泛采用，并且毫无怀疑它们将继续被采用。然而，根据牛顿第二定律的单位常数可以看出，它们之间有内在联系。并且会出现两种形式：在绝对单位制中如质量是基本单位，则力的单位是推导出来的。相反，在工程单位制中如力的单位是

基本单位，则质量单位是由牛顿第二定律推导出来的(表 I)。

表 I

量度	fps		cgs		MKS
	绝对	工程	绝对	工程	工程
长度	英尺	英尺	厘米	厘米	米
时间	秒	秒	秒	秒	秒
质量	磅-质量	斯拉格	克-质量	981 克	9.81 公斤
力或重量	磅达	磅-力	达因	克-力	公斤-力

1 斯拉格 = 32.2 磅-质量 1 克-力 = 981 达因 1 磅-力 = 32.2 磅达

MKS 绝对单位制就力学观点而论，它是与国际单位制(SI)相适应的。而且是乎还觉得 MKS 工程单位制有时还可以与国际单位制一起同时继续使用，有人已经建设在过渡期内，在英国标准米制中，国际单位制和工程单位制两者都可使用。

在解题时，最要紧的是只保持一种单位体系。如果数据资料是以不同的单位制给出，就应立即把它们变换成所选择的单位制：

量纲

量度某物所选择的单位是不会影响所测得的量值，一公斤水与 2.2046 磅水是完全相同的。有时不用任何特别的单位制，而用质量、长度、时间、力、温度等字眼，而且还更为方便。

在力学中，一切量都可用基本量纲，即质量 M、长度 L 和时间 T 表示。因此，

$$\text{加速度} = \frac{\text{距离}}{(\text{时间})^2}$$

$$\text{所以} \quad \text{加速度的量纲} = \frac{\text{距离的量纲}}{(\text{时间的量纲})^2} = \frac{L}{T^2}$$

$$\text{同理} \quad \text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$$

所以 力的量纲 = 质量的量纲 $\times$ 加速度的量纲 = $\frac{ML}{T^2}$

常用量的量纲如表 II 所示:

量纲方程

如果方程代表真实存在的某样东西, 那么方程两边各项都必须属于同一类型(例如, 都是力)并且两边在数量上也应相等, 要不然, 方程就毫无意义, 因每一项必须有同样的量纲, 这样就可以用相同的量纲进行比较。

例: 一物体开始的初速度为 u , 然后以加速 a , 运动了距离 s , 那么其末速度 v 就可由方程 $v^2 = u^2 + 2as$ 求得。如果该方程成立, 则把各量的量纲代入后, 方程各项一定具有相同的量纲。

各个量的量纲是 $v = LT^{-1}$, $u = LT^{-1}$, $a = LT^{-2}$, $s = L$ 。

v^2 的量纲是 $(LT^{-1})^2 = L^2T^{-2}$

u^2 的量纲是 $(LT^{-1})^2 = L^2T^{-2}$

$2as$ 的量纲是 $(LT^{-2}) \times L = L^2T^{-2}$

三项量纲约相同, 因此方程在量纲上是正确的, 是能够代表真实现象。

由于单纯的数字只是起系数的作用, 其量纲又是一致的, 所以在方程中, 这种纯数字无论是否正确, 在校核中可不必标出。

注意在有些实际工作中, 工程技术人员所用的公式在量纲上看起来是不正确的。例如: 流过矩形堰的流量 Q , 即每秒流过的体积 (m^3/s), 其公式是 $Q = 1.79BH^{3/2}$, 式中 B 是堰宽 (m) H 过堰水深 (m), 等式左边的量纲是 L^3T^{-1} , 而右边量纲显然是 $L^{5/2}$, 两边量纲不同的原因是系数 1.79 并不是一个纯数量, 而是国际单位制中 $0.57\sqrt{g}$ 的数值, 它的量纲是 $L^{1/2}T^{-1}$, 这样两边的量纲就一致了。

表 II 常用量纲

量 度		量 纲
长度、尺寸	包括一切线量度	L
面积	长度 $\times$ 长度	L^2
体积	面积 $\times$ 长度	L^3
面积一次矩	面积 $\times$ 长度	L^3
面积二次矩	面积 $\times$ 长度 ²	L^4
角度	比率: 弧/半径	1
应变	比率	1
时间		T
速度	距离/时间	LT^{-1}
角速度	角度/时间	T^{-1}
加速度	速度/时间	LT^{-2}
角加速度	角速度/时间	T^{-2}
体积变化率	体积/时间	L^3T^{-1}
运动粘滞系数	动力粘滞系数/质量密度	L^2T^{-1}
质量		M
力	质量 $\times$ 加速度	MLT^{-2}
重量	力	MLT^{-2}
质量密度	质量/体积	ML^{-3}
比重	重量/体积	$ML^{-2}T^{-2}$
压力(强度)	力/面积	$ML^{-1}T^{-2}$
剪应力	力/面积	$ML^{-1}T^{-2}$
弹性模数	应力/应变	$ML^{-1}T^{-2}$
冲量	力 $\times$ 时间	MLT^{-1}
动量	力 $\times$ 速度	MLT^{-1}
功能	力 $\times$ 距离	ML^2T^{-2}
功率	功/时间	ML^2T^{-3}
力矩	力 $\times$ 距离	ML^2T^{-2}
动力粘滞系数(度)	剪应力/流速梯度	$ML^{-1}T^{-1}$
表面张力	能量/面积	MT^{-2}

用量纲求单位换算因子

请见下例。

例：水在 95°F 的动力粘滞系数是 1.505×10^{-5} (英呎斯拉格单位制)，问用下列单位制表示其值是多少；(a) 泊；(b) 国际单位制。

由表 II 可知 η 的量纲是 M/LT 。

$$\begin{aligned}
 (a) \quad \therefore \frac{\eta(\text{泊})}{\eta(\text{英呎} \cdot \text{斯拉格} \cdot \text{秒})} &= \frac{M/LT(\text{cgs 绝对单位制})}{M/LT(\text{ft slug sec 单位制})} \\
 &= \frac{\text{质量}(\text{cgs 绝对单位制})}{\text{质量}(\text{ft slug sec 单位制})} \\
 &\quad \times \frac{\text{长度}(\text{ft slug sec})}{\text{长度}(\text{cgs})} \\
 &\quad \times \frac{\text{时间}(\text{ft slug sec})}{\text{时间}(\text{cgs})}
 \end{aligned}$$

$$1 \text{ 斯} = 32.2 \text{ 磅} \cdot \text{质量} = 32.2 \times 453.6 \text{ 克} \cdot \text{质量}$$

在这两种单位制中时间的单位制是 1 秒。

$$\begin{aligned}
 \therefore \eta(\text{泊}) &= \eta(\text{英呎} \cdot \text{斯拉格} \cdot \text{秒}) \cdot \frac{32.2 \times 453.6}{1} \times \frac{1}{30.48} \times \frac{1}{1} \\
 &= \frac{1.505 \times 10^{-5} \times 32.2 \times 453.6}{30.48} = 7.2 \times 10^{-3} \text{ 泊}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (b) \quad \frac{\eta(SI)}{\eta(\text{ft slug sec})} &= \frac{M/LT(\text{英呎} \cdot \text{斯拉格} \cdot \text{秒单位制})}{M/LT(\text{国际单位制})} \\
 &= \frac{\text{质量}(\text{SI 制})}{\text{质量}(\text{ft slug sec 制})} \\
 &\quad \times \frac{\text{长度}(\text{ft slug sec})}{\text{长度}(\text{SI})} \\
 &\quad \times \frac{\text{时间}(\text{ft slug sec})}{\text{时间}(\text{SI})}
 \end{aligned}$$

$$1 \text{ 斯} = 32.2 \text{ 磅} \cdot \text{质量} = 32.2 \times 453.6 \text{ 公斤} \cdot \text{质量}$$

1 英尺 = 0.3048 米

这两种单位制的时间单位均是 1 秒

$$\begin{aligned}\eta(S_{\text{制}}) &= \eta_{(\text{ft slug sec})} \frac{32.2 \times 0.4536}{1} \times \frac{1}{0.3048} \times \frac{1}{1} \\ &= \frac{1.505 \times 10^{-5} \times 32.2 \times 0.4536}{0.3048} \\ &= 7.2 \times 10^{-4} \text{ 公斤/米} \cdot \text{秒}.\end{aligned}$$

流 体 性 质

稠密度

稠密度有三种形式，但必须认真地区分它们。

1. 质量密度 ρ (希腊字母) 是单位体积内的质量。国际单位是公斤/米³ (kg/m³)，(fps 绝对单位制是磅·质量/英尺³，工程技术单位是斯-质量/英尺³)。

2. 容重 W 是单位体积内的重量。国际单位是：牛顿/米³ (N/m³) (fps 绝对单位是磅达/英尺³，技术单位是磅-瓦特/英尺³)。

由于 重量 = 质量 $\times$ 重力加速度，则

$$W = \rho g$$

3. 比重或相对密度 S 是物质的重量与水在 4°C 时同体积水重之比。

$$S = \frac{\text{物质重 } W}{\text{水重 } W} = \frac{\text{物质质量密度 } \rho}{\text{水质量密度 } \rho}$$

粘滞度

流体在静止时不能抵抗剪应力，但是一旦它处于运动中，在不同流速的运动流体之间，就会产生剪应力，根据流体的粘滞度即可确定它抵抗剪应力的能力(见13章)。

动力粘滞系数 η (希腊字母) 的定义是一层流体用单位速度拖

动另一层流体,通过单位距离的位移,所需要的单位面积力。国际单位是牛顿-秒/米²($N \cdot S/m^2$)或公斤/米-秒($kg/m \cdot s$)。

(fps 绝对单位是磅-质量/英尺-秒,技术单位是斯/英尺-秒)。

在 cgs 绝对单位制中,动力粘滞系数的单位是泊司(简称“泊”)1泊又分为100厘泊,(1泊=1克/厘米-秒)。

运动粘滞系数 ν (希腊字母)是动力粘滞系数与质量密度之比:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

注意:如果 η 的单位是公斤/米-秒,则 ρ 就必须是公斤/米³。因此 ν 的单位不取决于质量。在国际单位制中,它的单位是米²/秒(m^2/s)。(fps 单位制是英尺²/秒),在 cgs 单位制中,它的单位是斯托克斯(stoke)。1 斯托克斯又可分成100厘斯托克斯。

粘滞系数随温度而变化,液体的动力粘滞系数随温度升高而减小,但气体的动力粘滞系数随温度升高而增大。

泊司尤尔(Poiseuille)得出

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{1}{1 + at + bt^2} \right)$$

其中, η = 在 $t^\circ C$ 时的动力粘滞系数, η_0 = 在 $0^\circ C$ 时的动力粘滞系数, b 和 c 都是常数。

对水来说, $\eta_0 = 0.0179$ 泊司, $a = 0.033368$, $b = 0.00021$ 。

表面张力 σ (希腊字母)

在液体内,任一个分子都被它周围的其它分子以相等的力从各个方向吸引着,但是在液体和空气之间表面其上、下吸引力是不平衡的,液体表面就象在张力作用下的弹性薄膜,在表面上的每一点的表面张力是相同的,并垂直于液体表面上的任何一条线,表面张力不会因液面弯曲而受影响,对于两种不同的特定物质的分界面,只要温度一定,表面张力也是不变的,温度的升高将引

起表面张力的减小。

表面张力能使液体降落，往往是形成球形。如果把一支通管插入，在一根细管内，由于表面张力的作用产生了毛细管作用，湿润管壁的液体中，毛细管作用就能使管中的液体升起(图1a)。如果液体不能湿润管壁，管中液体就会下降，使得管内液面低于管外液面。

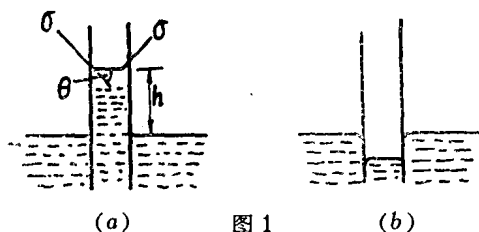


图 1

如果 θ 是液体和固体间的接触角，由于表面张力产生的上拉力 $= \sigma \pi d \cos \theta$ ，其中 d = 管的内径。

令 h = 上升液体的高度， W = 液体的容重，则

$$\text{上升液体的重量} = W \cdot \frac{\pi}{4} d^2 h$$

因此：

$$\sigma \pi d \cos \theta = W \frac{\pi}{4} d^2 h$$

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{W d}$$

读量水玻璃管的刻度时，毛细管作用就是产生读数误差的根源。对于水来说，如果管径为 6mm，则 h 将是 4.5mm，而对于水银相应的图见图 1b， h 就是 -1.5mm。

压缩性

对于液体，压力变化与体积变化之间的关系，可以用体积弹性模量 K 表示。

$$\begin{aligned}\text{体积弹性模量} &= \frac{\text{压强的改变}}{\text{体积应变}} \\ &= \frac{\text{压强的改变}}{(\text{体积改变}/\text{原体积})}\end{aligned}$$

对于气体，压力与体积的关系从气体定律中即可找到。

对于所有的完全气体有 $PV = RT$ ，其中 P = 绝对压力， V = 比体积 = $\frac{1}{w}$ ， T = 绝对温度， R = 气体常数。

如果在变化过程中是等温的(即在恒温下)则 $PV = \text{常数}$ 。

如果在变化过程中是绝热的(即没有获得或失去热)则 $PV^{\gamma} = \text{常数}$ ，其中 γ = 恒压力下的比热与常体积下的比热之比。