

中等专业学校教材

船舶原理

(下册)

(第二版)

郭春兰 主编

沈俊 主审



人民交通出版社

中等专业学校教材

船舶原理

Chuanbo Yuanli

(下 册)

(第 二 版)

郭春兰 主编
沈俊 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

船舶原理是指导船舶设计、建造、修理及使用的学科,是船舶制造与修理专业的一门主要专业课。

本书论述船舶原理的第二部分,即船舶动力学部分的内容,着重于讲述船舶的快速性和船舶的摇摆性及操纵性,以及船舶阻力计算和船舶螺旋桨的设计,此外,还介绍了一些有关流体力学的基本知识。

本书作为水路运输中等专业学校的教材,还可供有关船舶设计、制造、修理和各种航运单位的职工参考和学习。

图书在版编目(CIP)数据

船舶原理/郭春兰主编.-2版.-北京:人民交通出版社,1996

ISBN 7-114-02339-1

I. 船… II. 郭… III. 船舶原理 IV. U661

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第03459号

中等专业学校教材

船 舶 原 理

(下 册)

(第 二 版)

郭春兰 主编

沈 俊 主审

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京通县曙光印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:14.25 字数:355千

1990年6月 第1版

1996年9月 第2版 第1次印刷 累计2次

印数:2001-5540册 定价:11.50元

ISBN 7-114-02339-1

U·01618

前 言

本书是在 1990 年第一版的基础上,根据各校多年使用经验修改而成,计划学时 154。

船舶原理是指导船舶设计、建造、修理及使用的学科,是船舶制造与修理专业的一门主要专业课。第二版除保留第一版深入浅出、注重应用及河海兼顾的特色外,在内容上删繁就简,并增加了部分例题;同时保留了适当的选学内容,以利各类学校选用。

本书内容分船舶静力学和船舶动力学两部分。前者主要讲述船舶的浮性、稳性和抗沉性,并着重于船舶静水力性能计算和船舶稳性校核计算;后者主要讲述船舶的快速性和船舶摇摆及操纵性,并着重于船舶阻力计算和船舶螺旋桨设计。考虑中专实际,在船舶动力学部分,还介绍了一些有关流体力学的基础知识。

本书仍采用国际单位制;书中符号及名称,尽可能采用国家标准和 ITTC(国际船模试验池会议)推荐的符号。这些在书后均有附表,以便查阅。书后还附有习题,供练习参考。

本书分上下两册。上册为船舶静力学,由荀治国编写;下册为船舶动力学,其中船舶阻力和流体力学基础由荀治国编写,船舶推进和摇摆及操纵性由郭春兰编写,最后由郭春兰统稿。

本书由江苏省无锡船舶工业学校沈俊主审;各使用学校对本书也提出了许多宝贵意见;在编写过程中,还得到部教指委船舶工程学科委员会主任华乃导的大力支持,在此一并致谢。

鉴于编者水平及时间仓促,书中难免缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第二篇 船舶动力学

概述	1
第七章 流体力学基础知识	1
第一节 流体的性质	1
第二节 流体运动的一般概念	4
第三节 流体力学的几个基本方程	9
第八章 船舶阻力	13
第一节 船舶阻力基本概念	13
第二节 粘压阻力	18
第三节 摩擦阻力	20
第四节 兴波阻力	23
第五节 船舶在限制航道中的阻力	28
第九章 船模试验与阻力换算	31
第一节 船模试验	31
第二节 阻力换算	32
第三节 破波阻力	36
第十章 船舶阻力的近似估算	38
第一节 海军系数法	38
第二节 爱尔法	39
第三节 兹万科夫法	45
第十一章 船舶推进绪论	47
第一节 概述	47
第二节 功率与效率	49
第三节 螺旋桨的几何特征	53
第十二章 螺旋桨的理论基础	58
第一节 理想推进器和理想螺旋桨理论	58
第二节 螺旋桨的工作原理	63
第三节 螺旋桨模型的敞水试验	70
第四节 螺旋桨与船体的相互影响	73
第十三章 螺旋桨设计	80
第一节 螺旋桨设计方法及 B_p - δ 型图谱的应用	80
第二节 螺旋桨的空泡现象和强度校核	89

第三节	拖船的拖力曲线及自由航速的估算·····	108
第四节	设计螺旋桨时应考虑的若干因素·····	111
第五节	图谱设计螺旋桨实例·····	114
第六节	螺旋桨制图与制造工艺·····	122
第十四章	导管螺旋桨 ·····	140
第一节	导管螺旋桨的基本概念及优缺点·····	140
第二节	导管螺旋桨的主要几何参数·····	141
* 第三节	导管螺旋桨设计图谱及其应用·····	145
* 第四节	导管螺旋桨设计实例·····	148
第十五章	船舶操纵性 ·····	154
第一节	概述·····	154
第二节	舵的工作原理·····	154
* 第三节	舵的设计·····	162
* 第四节	操纵性衡准·····	179
第五节	实船的操纵试验·····	181
第六节	改善船舶操纵性的措施·····	185
第十六章	船舶摇摆 ·····	189
第一节	概述·····	189
* 第二节	船舶在静水中的摇摆·····	190
* 第三节	船舶在波浪中的摇摆·····	192
第四节	减摇装置·····	197
附录一	设计图谱 ·····	200
附录二	习题 ·····	209
附录三	常用单位换算表 ·····	217
附录四	本书主要符号名称及单位换算表 ·····	219

第二篇 船舶动力学

概 述

船舶动力学是研究船舶运动规律的一门科学,是船舶原理的重要组成部分。

目前对于船舶动力学的研究相对船舶静力学来讲,还有许多不够完善的地方,新的观点和研究方法不断出现。本篇讲述的主要内容仅限于以下几个方面:

研究船舶的各种阻力的性质,找出阻力随航速、船型及外界条件变化的规律,进而探讨减小各种阻力的办法,最后还需计算船舶阻力的大小,作为决定主机功率、设计推进器的依据。

研究船舶的推进问题,即研究船舶螺旋桨推进器的基本原理和工作特性;利用图谱设计螺旋桨的方法及步骤。

讲述船舶摇摆与操纵的基本概念,各种减摇装置的作用以及舵这种操纵装置的工作原理。

船舶动力学的理论基础是流体动力学。为学习方便,在讲述船舶动力学之前,先简要介绍一些流体力学的基础知识。

船舶动力学中讨论的问题,是船舶设计、建造和使用中经常用到的基础知识。因此,它也是船体专业的一门重要的专业课。

第七章 流体力学基础知识

船舶上所受的流体力是流体与船体之间相互作用的结果,它们之间以一定的规律联系着。要研究这些规律,就必须对流体的性质及流体的运动加以研究,本章仅介绍与我们所学内容有关的一些流体力学知识。

第一节 流体的性质

容易流动连续介质称为流体。自然界的流体主要有液体和气体两种。由于船舶主要在水这种流体中运动,故我们只研究水流体的性质。通常,水流体的性质可以用密度、重度、压缩性和膨胀性、粘性等物理量来表示。

一、密度和重度

水是一种均匀物质,它与固体一样,也具有质量。单位体积内所具有的质量称为质量密度

或简称为密度,常用的符号是 ρ 。密度 ρ 可表示为:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7-1)$$

式中: ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

m ——流体质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

在一般工程计算中,取淡水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$,海水的密度为 $1025\text{kg}/\text{m}^3$ 。

任何物体在地心引力作用下,都具有重力。在均质流体中,流体具有的重力与其所占有的容积(体积)之比称为重度,常用 γ 表示。若以 V 表示流体的体积,以 G 表示该体积流体的重力,根据定义则有:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (7-2)$$

在国际单位制中,重度的单位用 N/m^3 。

流体的密度与重度有一定关系。根据牛顿第二定律,某物体的重力等于其质量与重力加速度的乘积,即 $G=mg$ 。于是由式(7-1)及(7-2)可得:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma V}{gV} = \frac{\gamma}{g}$$

或:

$$\gamma = \rho g$$

式中: g ——重力加速度(计算中取 $g=9.8\text{m}/\text{s}^2$)。

二、压缩性和膨胀性

流体的体积随压力增加而变小的特性称为压缩性;流体的体积随温度的增加而变大的特性称为膨胀性。

实验证明,在常温下,当压力从 1 个大气压增加到 100 个大气压时(相当于 1000m 深的水下压强),水的密度只增加 0.5%;当温度从 4°C 增加到 45°C 时,水的密度只减小 1%。可见,当压力和温度变化时,对水的密度变化影响极小。所以,在研究船舶在水中运动时,实际上认为水是一种不可压缩的均质流体,其压缩性和膨胀性忽略不计。

三、粘性及摩擦力

水是具有粘性的流体。在船的水阻力中,就有一部分是由于水具有粘性而产生。水的粘性表现在:当其某一层对相邻的一层有相对运动时,它们之间即产生切应力(内摩擦力)。

如图 7-1 所示,在两平板间充满粘性流体,其间距为 y 。设下平板固定不动,上平板以速度 v 向右移动。这时贴近平板面的流体质点,由于粘性作用必附着于板面,故与上平板面贴近的流体质点将以同样的速度 v 向右移动,而紧贴下平板面的流体质点的移动速度为零。若两平板间间距极小,则两平板间流体质点的速度分布规律为直线(如图 7-1),反之,速度分布规律为曲线。

设移动上平板所需单位面积的力为 τ_0 , τ_0 即为粘性流体作用于移动平面上的切应力。根据实验可知, τ_0 与 $\frac{v}{y}$ 成正比,因此有:

$$\tau_0 = \mu \frac{v}{y} \quad (7-3)$$

式中： μ ——流体动力粘性系数， $N \cdot s/m^2$ 。

上式是在特殊情况下导出的(两平板间距极小)，即速度随着离下平板的距离增大而均匀地增大。在和流动相垂直的方向上，速度的空间变化率叫做在这个方向的速度梯度。在上述特殊情况下，速度梯度是 $\frac{v}{y}$ 。在一般情况下，速度梯度不是均匀的，在任一点的速度梯度值应为 $\frac{dv}{dy}$ ，于是，作用于移动平面上的切应力的一般形式为：

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (7-4)$$

从上式可以看出，当流体处于静止状态(或相对静止状态)时， $\frac{dv}{dy}=0$ ，故切应力 τ 为零，换句话说，流体的静摩擦力不存在。所以，只有当流体运动时才显示出粘性来。

各种液体的动力粘性系数值是不相同的，且 μ 值随液体温度的升高而降低，随压力的增高而增大，但压力对 μ 值影响很小。所以，在造船工程中，通常只考虑温度对液体 μ 值的影响。

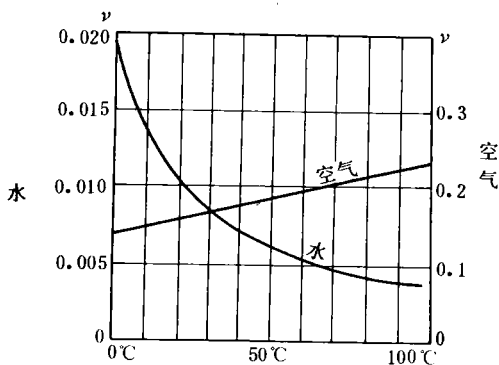


图 7-2 γ 与温度的关系

空气的 μ 值变化与水的 μ 值变化特性相反，空气的 μ 值随温度的增加而增大。相对水而言，空气 μ 值很小，在 15°C 时，两者的比值为 $\mu_{\text{空}}/\mu_{\text{水}}=0.0155$ 。

由于空气的 μ 值较水的 μ 值小很多，所以在船舶总阻力成分中，空气的阻力比水的阻力小得多，故一般不对空气的阻力作专门研究。

在实际计算中，常用到一个所谓运动粘性系数 γ 的概念，它是动力粘性系数 μ 和密度 ρ 的比值，即：

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (7-5)$$

运动粘性系数 γ 值与流体的性质有关，海水与淡水不同，水和空气也不同。从试验得知， γ 值同样是温度的函数，见图 7-2 所示。根据国际试验水池的资料，淡水与海水的运动粘性系数 γ 值与温度的关系如表 7-1 所示。

水的运动粘性系数 γ 和质量密度 ρ

表 7-1

淡 水		水 温	海 水		淡 水		水 温	海 水	
$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³	t °C	$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³	$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³	t °C	$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³
1.78667	101.95	0	1.82844	104.83	1.34463	101.94	9	1.39152	104.73
1.72701	101.95	1	1.76915	104.82	1.30641	101.93	10	1.35383	104.71
1.67040	101.96	2	1.71306	104.81	1.26988	101.92	11	1.31773	104.69
1.61665	101.96	3	1.65988	104.81	1.23495	101.91	12	1.28324	104.68
1.56557	101.96	4	1.60940	104.80	1.20159	101.90	13	1.25028	104.65
1.51698	101.96	5	1.56142	104.79	1.16964	101.88	14	1.21862	104.63
1.47070	101.96	6	1.51584	104.77	1.13902	101.87	15	1.18831	104.61
1.42667	101.95	7	1.47242	104.76	1.10966	101.86	16	1.15916	104.59
1.38471	101.95	8	1.43102	104.74	1.08155	101.84	17	1.13125	104.56

续上表

淡 水		水 温	海 水		淡 水		水 温	海 水	
$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³	t °C	$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³	$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³	t °C	$\gamma \times 10^6$ m ² /s	ρ/g kg/m ³
1.05456	101.82	18	1.10438	104.54	0.89292	101.66	25	0.94252	104.34
1.02865	101.80	19	1.07854	104.52	0.87313	101.64	26	0.92255	104.31
1.0037	101.78	20	1.05372	104.49	0.85409	101.61	27	0.90331	104.28
0.97984	101.76	21	1.02981	104.46	0.83572	101.58	28	0.88470	104.24
0.95682	101.74	22	1.00678	104.43	0.81798	101.55	29	0.86671	104.21
0.93471	101.71	23	0.98457	104.40	0.80092	101.52	30	0.84931	104.18
0.91340	101.69	24	0.96315	104.37					

注： g 为重力加速度，一般取值为 9.8m/s^2 。

第二节 流体运动的一般概念

船舶在水中航行时将受到很大的水阻力，这种水阻力是船与水相对运动的结果。为了研究水阻力，必须先对流体本身的运动有所了解，这些均属“流体动力学”的范畴，下面作简要介绍。

一、稳定流动与非稳定流动

流体的运动可分为稳定流动和非稳定流动两种。如在任意固定空间处，流体运动速度 v 和压力 p 不随时间而变化，这样的运动称之为稳定流动，亦称定常流动。反之，若流体运动速度 v 和压力 p 随时间而变化，则称为非稳定流动或非定常流动。对于稳定流动，流体运动要素仅是空间坐标 x, y, z 的函数，即：

$$v = v(x, y, z)$$

$$p = p(x, y, z)$$

对于非稳定流动，流体运动要素又是时间 t 的函数，即：

$$v = v(x, y, z, t)$$

$$p = p(x, y, z, t)$$

我们可以从船体相对于流体运动来看稳定流动和非稳定流动的情况。如图 7-3a) 所示，当等速均匀的水流沿船体流过时，在相对于船体的某任意空间点 A (或 B) 处的流速 v_A (或 v_B) 是不随时间而变化的，水流的这种运动称为稳定流动。

稳定流动是匀速运动的流体质点相对静止的船体运动而产生的，当船舶在水中运动时，如果我们站在岸上观察船所引起的水的运动，情况将有很大的不同。如图 7-3b) 所示，在任意空间点 A 处的水流速度随时间而变化，当船靠近它时，其流速增大；船远离它时，其流速减小，直至趋向于零。我们称水流的这种运动为非稳定流动。

对于非稳定流动，由于其运动要素与时间有关，研究起来较困难。若上述船舶在水中作等速直线运动，我们让观察者站在船上，则观察者看到的流动就好象船不动，而是均匀水流以与船速相等而方向相反流过船身的情况一样。如在相对于观察者为固定的 A 处，其流速始终不变，这样的流动成为稳定流动。如图 7-3c) 所示。

据上所述，对于船舶在流体中作等速直线运动所引起的非稳定流动(观察者站在地球上，坐标系也固定在地球上)，只要把研究流体运动的坐标系从地球上移到等速运动的船上，即可

转化为船不动,而水流以与船速相等方向相反流经船身,这时流体运动便成为稳定流动了。根据力学相对性原理,经这样的坐标系转换后,虽然船舶在水流中作等速直线运动所产生的流场动能,比船舶不动而整个流场以匀速流向船舶所具有的动能小得多(即流体运动的绝对速度和动能不同),但是,流体与船舶间的相互作用力是相同的,而我们要研究的正是流体作用力的问题。这种坐标系的转换方法称为运动转换,研究船舶动力学问题时,常作这样的转换。

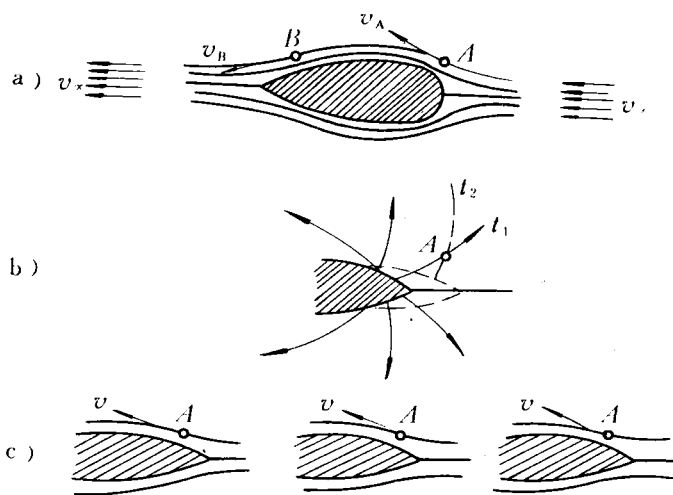


图 7-3 稳定与非稳定流动

二、迹线、流线和流管的基本概念

研究流体运动时,常用到迹线、流线和流管的概念,以表达流体的运动情况。下面分别作简要介绍。

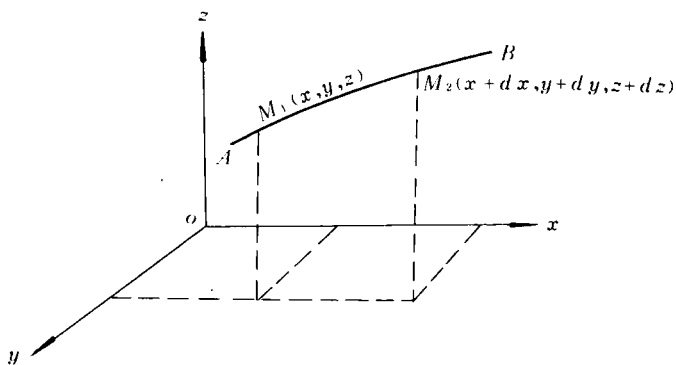


图 7-4 迹线

1. 迹线

迹线是流体质点在空间运动的轨迹。图 7-4 所示 AB 曲线是流体质点运动时由 A 到 B 的轨迹。设在瞬时间内,该质点于任意点 $M_1(x, y, z)$ 位置,经过极短时间 dt 后,移动了极短距离 ds ,而到达 M_2 点位置,这时质点的坐标为 $M_2(x+dx, y+dy, z+dz)$ 。因此,迹线上的任意一点表示流体质点在空间的位置。

2. 流线

流体的运动情况可用流线来描述,如图 7-5 所示。

流线就是流动曲线,在此线上每一点的切线代表在同一瞬时该点处流体质点的运动方向,如图 7-5a) 所示。

设某一瞬时 t ,在运动着的流场内任取一流体质点 A ,此时在该点处的流速为 v_1 ,于表示 v_1 的向量上取微长度 ΔS_1 到流场空间的另一点 B ;同一瞬时, B 点处的流体质点流速为 v_2 ,再于表示 v_2 的向量上取微长度 ΔS_2 到流场空间的另一点 C 。依此类推,可在瞬间 t 内得到流场中一系列流体质点连成的折线 $ABCDE \dots$,如图 7-5b) 所示。若所述各质点无限接近,即各质点的距离 $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots$ 趋于零,则该折线为一条光滑的曲线。因此,所谓流线即流场中的流体质点流动曲线,在该曲线上每一点的切线代表同一瞬时各点处流体质点的运动方向。流体在空间的

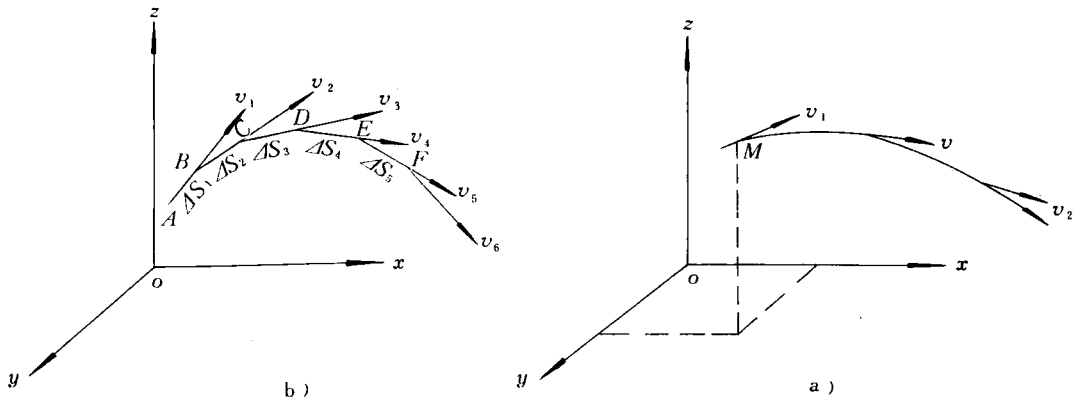


图 7-5 流线

位置,则由流体运动速度的分布规律来决定。

流线有两个特性:一是流体质点不会穿过流线,因为它在流线上的运动方向是沿切线方向的;二是在同一瞬时的两根流线决不会相交,这是由于流体每个质点只能有一个流速方向,所以通过一点只能有一条流线,换句话说,流线不能相交。

在稳定流动情况下,由于流速不随时间而变化,流线也就不随时间而改变其形状,因此迹线与流线重合。在非稳定流动中,流线随时间而改变其形状,因此迹线与流线是不同的线。

3. 流管

在流场中,任取一封闭的曲线 C ,经过曲线 C 上每一点都有一条流线,所有这些流线就围成一个象管壁一样的曲面,称为流管,如图 7-6 所示。

流管也是瞬时概念,一般说来,流管的形状随时间而变;但在稳定流动中,流管的形状保持不变,流体将沿流管流动。由于流管表面是由流线所组成,因此流体不能流出或流入流管。可见,在稳定流动中流管与真实的管子一样。

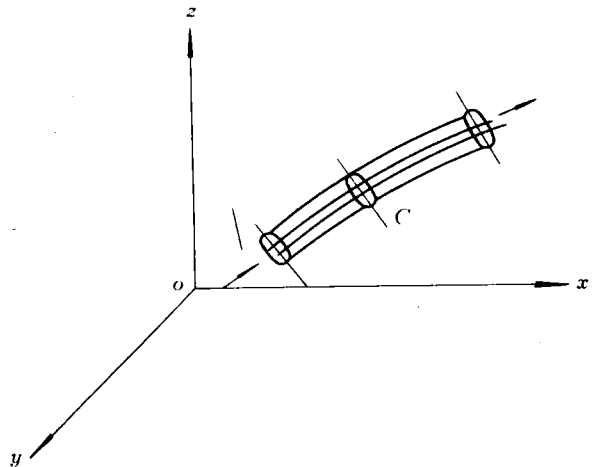


图 7-6 流管

三、层流和紊流

实际流体(如水)运动时,存在着层流和紊流两种截然不同的流动状态。所谓层流是指当流体运动时,质点互相不干扰混杂,迹线有条不紊的流态,又称片流;而紊流是指流体运动时,质点互相干扰混杂,迹线极不规则,速度和方向都出现明显紊乱变动的流态,又称乱流。

这两种流态可以从试验中观察出来,称为雷诺试验。雷诺试验如图 7-7 所示。过程如下:

用光滑的玻璃管从桶中放水,桶中装置盛有红色染液的小管。当玻璃管中放水时,将红色染液同时放出。当玻璃管中液体流速较低时,红色线成一直线,如图 7-7b)所示,此时的流动状态称为层流。若流速增加,至某一临界值时,红色线发生曲折,如图 7-7c)所示,此时层流已开始消失,紊流已开始。如果流速再增加,红色线弯曲而折断,如图 7-7d)所示,表示流体运动已乱。

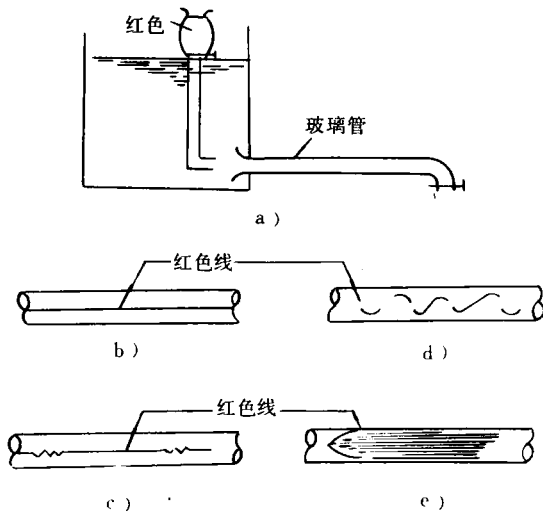


图 7-7 雷诺试验

若流速再增加,则红色充满全玻璃管,表示玻璃管中全部变为紊流,层流不复存在。

上述试验证明,同一流体、同一管道,但由于流速不同,可以形成性质完全不同的流动状态,即层流和紊流。我们把流动状态由层流转变为紊流时的流速叫做临界速度 v_c 。

根据雷诺试验可知,临界速度 v_c 与流体的运动粘性系数 γ 有关,与试验的玻璃管直径 D 有关,用式表示为:

$$v_c = R_{NC} \frac{\gamma}{D}$$

式中: R_{NC} ——临界雷诺数。

试验发现,对于直径 D 不同的玻璃管,每一临界速度 v_c 所相当的雷诺数 R_{NC} 值是相同的,由此可得出结论:对同一流体,流动状态仅与雷诺数有关。

经试验,水流的临界雷诺数 $R_{NC} \approx 2000$ 。

根据水流体的临界雷诺数 R_{NC} 值,可以判别其不同情况下的流态。这时,首先要求出该情况下的雷诺数 R_N ($R_N = \frac{vD}{\gamma}$),然后比较 R_N 值与 R_{NC} 值。一般情况下, $R_N < R_{NC}$ 时,流动状态为层流; $R_N > R_{NC}$ 时,流动状态为紊流,其中间段称为过渡流。

航行于水面的船舶,考虑水的流动状态影响时,其雷诺数以下式表示:

$$R_N = \frac{LV}{\nu} \quad (7-6)$$

式中: V ——船速, m/s;

L ——船长, m;

ν ——水的运动粘性系数, m^2/s 。

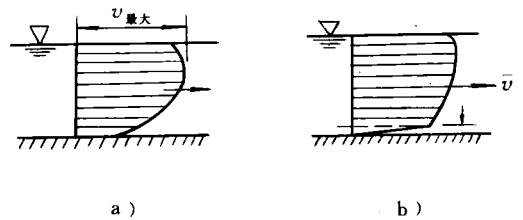


图 7-8 层流及紊流的速度分布

流体运动时,对应于不同的流态,其断面上的流速分布是不同的。图 7-8a) 表示液体运动状态为层流时的流速分布,可见,最大流速在接近液面处。图 7-8b) 表示液体运动状态为紊流时的流速分布,可见,由于紊流的混杂运动,其速度分布较均匀。

四、边界层与流体运动

在研究流体运动时,为了问题的简化,常根据边界层理论,将流体分为“实际流体运动”及“理想流体运动”。

1. 边界层的概念

设一薄板置于均匀流场中,水流以匀速 v 流向平板,如图 7-9 所示。在平板的前端 o 点,水的流速为 v ,当水流过平板时,由于水具有粘性,故平板表面处的水质点均被吸附在平板上,所以平板表面上的水质点的流速为零,而随着距平板表面的距离 y 的增加,其流速亦渐增,当 y 增至某一值 δ 时,该处流速达到水流速度 v 值。我们称存在粘性作用的这一薄层水流为边界层,而 δ 称为边界层厚度。

由以上看出,在边界层内,速度变化在距离 δ 内由零迅速增至 v ,即速度变化率(速度梯度)很大,据式(7-4)可知,在边界层内存在着切应力 $\tau = \mu \frac{dv}{dy}$,即存在摩擦力 F ,其大小为整个平板上切应力之总和,可表示为:

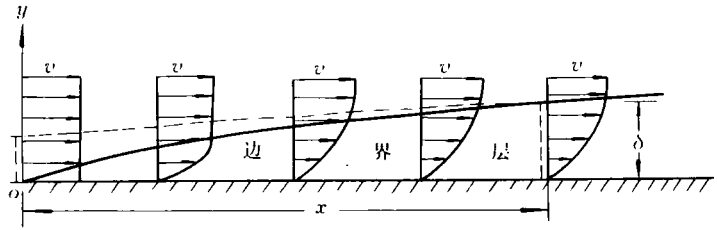


图 7-9 平板边界层

$$F = \int_s \tau ds$$

边界层内摩擦力的大小与边界层厚度 δ 有关,而边界层厚度 δ 可表示为:

$$\delta = 0.37xR_N^{-\frac{1}{2}}$$

式中: x ——边界层厚度 δ 距端点的距离;

R_N ——雷诺数。

经研究, $\delta \propto x^{1-\frac{1}{2}} = x^{0.5}$,即当 x 增加时,边界层厚度 δ 增加; δ 还与流速 v 有关, v 增大时, R_N 增大,则 δ 变小。也就是说,边界薄或速度大均使速度梯度大,从而使摩擦力增大。

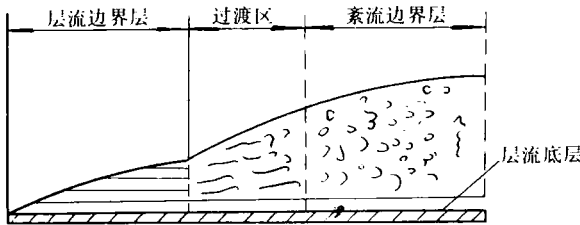


图 7-10 边界层内不同的流动状态

另外,观察边界层内的流动状态发现,平板前端为层流状态,平板后部为紊流状态,中间处于过渡流状态,但是紧靠平板表面,由于水质点运动受到限制,仍为层流状态,称为层流底层,如图 7-10 所示。在处于紊流状态的紊流边界层内,水质点互相撞击发生动量交换,以至使边界层内的速度分布较层流时均匀,所以邻近

平板表面的速度梯度增大,切应力亦随之增大。因此,摩擦力的大小还取决于边界层内的流动状态。

由上述边界层理论,可以得到平板在流体中以均匀速度运动时,所受到的摩擦阻力的主要特性:摩擦阻力仅由于流体的粘性而产生,且仅在边界层内部产生作用;影响摩擦阻力的因素有边界层厚度和边界层内的流动状态,而这两者均取决于雷诺数;摩擦阻力的大小正比于平板的面积。

2. 实际流体运动与理想流体运动

根据边界层理论,如果某物体在流体中运动时,其与流体接触的表面必然附着一边界层,边界层随物体一起运动,这就是物体在实际流体中的运动,按运动的相对性,流体的运动为实际流体运动。然而,从图 7-9 可看出,在边界层以外,速度变化率很小,即切应力很小,可忽略不计。因此物体的运动受粘性影响仅仅在边界层以内,而在边界层外几乎不受影响,故我们可把边界层以外的流体当作无粘性流体,无粘性的假想流体称为“理想流体”。如果我们研究的物体运动的某种阻力与粘性无关,那么,我们可以视物体在无粘性的流体中运动,即在“理想流体”中运动,而流体的运动则为理想流体运动,这样问题可大为简化。图 7-11 为实际流体运动和理想流体运动的示意图。

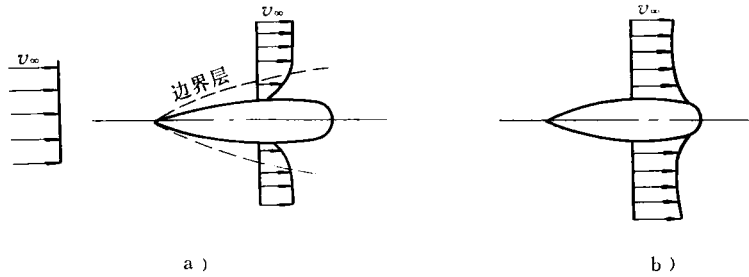


图 7-11 流体的运动
a)实际流体运动;b)理想流体运动

第三节 流体力学的几个基本方程

流体力学中的“连续性方程”、“伯努利方程”、“动量方程”建立了一些主要运动要素间的数量关系,对于解释流体的运动现象及进行一些简单的计算是非常有用的,下面分别介绍。

一、连续性方程

假设在任一稳定流动的流体内,取一流管,它的截面分别为 1-1 和 2-2, s_1 和 s_2 为两截面的面积, v_1 和 v_2 分别为两截面处的流速,如图 7-12 所示。经过 dt 时间,该段流体流到 1'-1' 和 2'-2' 位置,即截面 1-1 移动了一个距离 $dl_1 = v_1 dt$, 截面 2-2 移动了 $dl_2 = v_2 dt$ 。

由于没有流体通过流管的管壁,且流体是连续的和不可压缩的,因此原有流体质量不应有所增减,即体积不应有所增减,也就是 1-2 段体积和 1'-2' 段体积应相等,又因 1'-2 段体积为二者所共有,故 1-1' 段体积和 2-2' 段体积也应相等,即:

$$dl_1 s_1 = dl_2 s_2$$

或:

$$v_1 dt s_1 = v_2 dt s_2$$

$$v_1 s_1 = v_2 s_2$$

(7-7)

由于两截面是任取的,因此这个关系式沿整个流管均是符合的,一般可写成:

$$v \cdot s = \text{常数}$$

(7-8)

这个关系式称为不可压缩流体的连续性方程。它说明在同一流管中,流体的流速和流管的截面积的乘积为一常数。可见,在流管中截面大的地方其流速必小,截面小的地方流速必大,也就是流管中流速与截面积成反比。一般把 $v \cdot s$ 记作 Q , 称为流量。因此,连续性方程说明沿流管流量处处相等。

若将式(7-7)两边同乘以流体密度 ρ , 则有:

$$\rho v_1 \cdot s_1 = \rho v_2 \cdot s_2 = \rho Q$$

上式说明,流进这段流管中的流体质量等于流出这段流管中的流体质量,因此连续性方程的实质是质量守恒定律的具体表现。

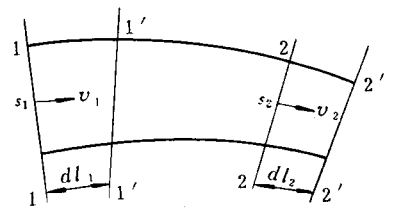


图 7-12 流体的连续性

二、伯努利方程

在研究不可压缩无粘性的理想流体沿水平流管流动时我们发现,如果流管各处的截面积不同,则各处的流速也不同,流体是加速或减速流动的。因此流体必然受到合力作用。就是说,虽然流管各处高度相同,但沿流管各处的压力是不同的。如果流管不是水平的,即流管各处的高度不同,那么,流管里不同两点的压力差不仅与这两点间高度差有关,而且也与这两点的流速差有关。流管任意两点压力差的一般表现形式由“伯努利方程”给出。伯努利方程可应用功能原理导出。

图 7-13 是流管的一部分,端面 a 的横截面积为 s_1 , 压力为 p_1 , 流速为 v_1 , 到参考平面的高度为 y_1 。而另一端面 c 的上述各量分别为 s_2 、 p_2 、 v_2 及 y_2 。

经过时间 dt 后,处于截面 a 、 c 之间的流体段移动到 b 、 d 之间, a 、 c 截面的位移分别为 dl_1 及 dl_2 。根据流体连续性方程,截面 a 和 b 之间的流体段体积与截面 c 和 d 之间的体积相等,即 $dV = s_1 dl_1 = s_2 dl_2$ 。由于 b 、 c 之间的流体段为流动前后两流体段所共有,显然,研究 a 、 c 之间流体段流动到 b 、 d 段的功能变化,与研究体积为 dV 的流体之功能变化是一样的。据功能原理,作用在截面 a 上的力是 $p_1 s_1$, 作用在 c 上的力是 $p_2 s_2$, 故使体积 dV 流体位移需要作的净功为:

$$W = p_1 s_1 dl_1 - p_2 s_2 dl_2 = (p_1 - p_2) dV$$

而在时间 dt 内,体积为 dV , 质量为 $dm = \rho dV$ 的流体通过截面 a 进入流管时所携带的动能为 $\frac{1}{2} dm v_1^2 = \frac{1}{2} \rho dV v_1^2$ 。同理,在同一时间里,质量相等的流体由截面 c 流出时所携带的动能为 $\frac{1}{2} dm v_2^2 = \frac{1}{2} \rho dV v_2^2$, 于是,动能的净改变为:

$$dE_K = \frac{1}{2} \rho dV (v_2^2 - v_1^2)$$

同样,势能也有改变。在 dt 时间内,进水截面 a 的流体质量的势能是 $dmg y_1 = \rho dV g y_1$, 由截面 c 流出的流体质量的势能是 $dmg y_2 = \rho dV g y_2$, 势能的净改变为:

$$dE_P = \rho dV g (y_2 - y_1)$$

根据功能原理, $W = dE_K + dE_P$, 则有:

$$(p_1 - p_2) dV = \frac{1}{2} \rho dV (v_2^2 - v_1^2) + \rho dV g (y_2 - y_1)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (y_2 - y_1) \quad (7-9)$$

这种形式的伯努利方程表示对于单位面积流体作的功 $dV(p_1 - p_2)$ 等于单位体积内的动能和势能改变之和。从压力方面解释,即等式右边第二项表示的是流体重量和流体段两端高度差所形成的压力差,而第一项表示由流体速度的改变所形成的附加压力差。

式(7-9)也可写成:

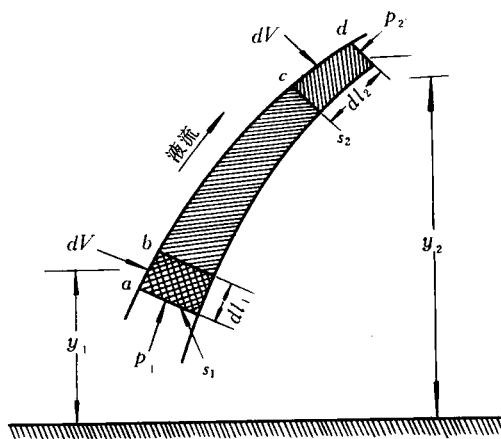


图 7-13 流体压力流速及高度

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

或写成：

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + y_2 \quad (7-10)$$

因为流管的截面是任意取的，故伯努利方程也可写成：

$$p + \rho g y + \frac{1}{2} \rho v^2 = H (\text{恒量})$$

上式表示在同一流管上的 H 值相等。式中，压力的单位是 N/m^2 (Pa)，密度的单位是 kg/m^3 ，速度的单位是 m/s 。

式(7-10)形式的伯努利方程各项的几何意义和物理意义如下：

1. 几何意义

(1) y 为几何高度，表示位置，又称位置水头。

(2) $\frac{p}{\rho g}$ 为压力水头，表示水流截面同一点的静压力高度。

(3) $\frac{v^2}{2g}$ 为速度水头，表示流速高度。

因此，伯努利方程的几何性质为：位置水头、压力水头、速度水头三者之和为一常数，称为总水头。图 7-14 为伯努利方程的几何图解。

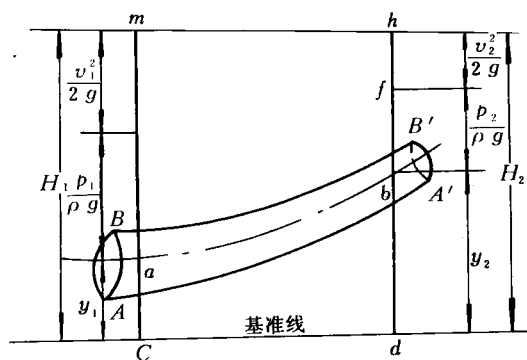


图 7-14 伯努利方程的几何图解

2. 物理意义

(1) y 为单位体积的位能。

(2) $\frac{p}{\rho g}$ 为单位体积的压能，即单位体积压力所作的功。

(3) $\frac{v^2}{2g}$ 为单位体积的动能。

因此，伯努利方程的物理含意为：单位体积的位能、压能和动能之和为一常数，即总能量在流场中处处相等。

如果把伯努利方程推广到水平流管这一特殊情况，此时 $y_1 = y_2$ ，则方程可写为：

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

由上式可知，伯努利方程建立了速度和压力的数量关系，即速度大压力小，速度小则压力大。这一结论在船舶动力学中十分有用。

上述伯努利方程是由理想流体运动导出，但只要稍加修正，也可用于实际流体。这是由于实际流体的粘性将引起摩擦阻力和局部涡流阻力，流体能量必然损失，因此总能量不能保持一常数，即 $H \neq C$ (常数)。若加上流管中两截面处的能量损失 h_w ，则伯努利方程可采取下式表示：

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + y_2 + k_w$$

伯努利方程在工程上十分有用，除利用其原理制造许用仪器(如：计程仪、量水计等)外，还可定性地解释一些运动现象。例如船用螺旋桨为什么会产生推力，飞机的机翼为什么会产生升