理想流体作用下的物体运动

——流体阻力和升力的计算

郑焕武 著

光明日报出版社

理想流体作用下的物体运动

LIXIANGLIUTIZUOYONG
XIADEWUTIYUNDONG

——流体阻力和升力的计算

郑焕武 著

光明日报出版社

图书在版编目（CIP）数据

理想流体作用下的物体运动：流体阻力和升力的计算／郑焕武著．—北京：光明日报出版社，2014.5

ISBN 978－7－5112－6454－1

Ⅰ.①理… Ⅱ.①郑… Ⅲ.①理论流体力学 Ⅳ.①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 090923 号

理想流体作用下的物体运动：流体阻力和升力的计算

著　　者：郑焕武

责任编辑：曹美娜　　责任校对：韩　梅

封面设计：杨万宁　　责任印制：曹　净

版式设计：苏玉敏

出版发行：光明日报出版社

地　　址：北京市东城区（原崇文区）珠市口东大街 5 号，100062

电　　话：010－67078248（咨询），67078870（发行），67078235（邮购）

传　　真：010－67078227，67078255

网　　址：http://book.gmw.cn/

E－mail：gmcbs@gmw.cn，caomeina@gmw.cn

法律顾问：北京天驰洪范律师事务所徐波律师

印　刷：北京市荣祥印刷装订有限公司

装　订：北京市荣祥印刷装订有限公司

本书如有破损、缺页、装订错误，请与本社联系调换

开　本：880×1230 毫米　1/32

字　数：233 千字　　印　张：9

版　次：2014 年 6 月北京第 1 版　　印　次：2014 年 6 月第 1 次印刷

书　号：ISBN 978－7－5112－6454－1

定　价：26.00 元

版权所有　翻印必究

目　录

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.co

第一章　理想流体与物体作用力的理论思考

§1－1　流体与理想流体

一、流体

1. 流体的物理性质

流体是物质，是一种能够流动并没有固定形态的物质。液体和气体统称为流体。流体和固体之间既有相同的方面，又有不同的地方。相同的方面是，流体与固体都是由大量的分子和原子组成，而分子和原子都具有一定的大小和质量，是客观存在的物质。所以流体和固体一样都是由客观物质组成的实体，这就是流体的物质性。不同的地方是，组成流体的大量分子在不停地作热运动，并且没有固定的平衡位置，分子与分子之间有作用力，但作用力远小于固体分子间的作用力，所以在重力场中，由于重力的作用，流体具有流动性。流动性是流体区别于其他物体的主要特性。

由于流体有流动性，流体与物体之间有许多不同的物理性质。一是固体有一定的大小和形状，因此，固体有确定的质心和质量，固体的运动满足质心运动定律。而流体没有确定的大小和形状，因此，也就没有确定的质心和质量。流体的运动不满足质心运动定律。二是流体内部有压强，流体内部任一点的压强来自各个方向，并各个方向指向同一点的压强大小相等，而固体内部的压强没有这种性质。由于流体是可流动的物质，在重力作用下具有重量，上面的流体对下面的流体要产生压力，有压力就有流

体内部的压强。流体的流动性就是由于流体内部各相邻流体相互挤压的结果。若要流体不流动，就要克服流体内部产生的横向压力，即把流体装入容器里或者让流体不受重力的作用。设想，如果流体不受重力的作用或让流体处于失重状态，则流体就没有重量，也就没有内部压强，此时，玻璃板上的小水珠一定是球形，并且小水珠对玻璃板的压力为零。流体内部压强的大小除与流体的深度有关外，还与流体的运动状态（即速度）有关，并满足伯努利方程。三是流体内部有一定的粘性和可压缩性，流体的粘性和可压缩性一般都是在流体流动或受到外力作用时才会表现出来，而固体没有。

2. 流体的运动特点

流体的运动就是流动。而流体的流动是组成流体的分子群在一定条件下的定向运动，是各个分子单独运动的宏观表现。所以，流体的流动与固体的运动在本质上是相同的，都是在一定条件下的物质运动，在运动中都具有动量和动能。但在形式上又不完全相同，固体的运动比较简单和直观，在有的情况下还可以把运动物体抽象为质点，物体的运动可简化成质点的运动。因此，运动变化清楚，运动状态直观，运动速度就是单位时间物体或者质点的位移变化，具有明确而简单的物理意义。但流体的运动没有这么简单，流动的流体没有确定的形状和大小，而是连绵不断的水分子的群体运动，因此，流体的流速不再是用来描述位移变化快慢的量度，而是表示不同时刻流体流过空间某一横截面的快慢程度。用（x，y，z）表示横截面上各点的位置坐标，用 t 表示不同的时刻，则有流体的速度为

$$u = u(x,y,z,t) \tag{1-1}$$

如果 x，y，z 是常数，而 t 是变数，则上式为不同时刻流体流过空间某一指定位置的速度，反之，如果 t 是常数，而 x，y，z 是变数，则上式为同一时刻流体流过空间不同位置的速度。故由（1－1）式的表示得出，流体流动的速度不是针对某一个别流体

质点的描述，而是针对流动中的所有流体质点的描述，是所有流体质点通过某一确定位置的快慢程度的描述。

另外，由于流体有粘滞性，当流体流动时，流体内部流层与流层之间有内摩擦力，流体与物体接触面之间也有摩擦力，在摩擦力的作用下，流体流过同一横截面时，横截面上各点的速度一般不相等。又因为流体都有一定的可压缩性，在流体流动或受外力作用时，流体的体积和密度都要发生一定的变化，即为时间和空间的函数。

二、理想流体

1. 理想流体模型

在物理学中，有的问题往往要由多个因素共同决定，其中有的因素对问题的结果起着主要的作用，而有的因素则起着次要的作用，因此，为了简化计算和讨论，在一定的条件下，有时可以将某些问题的次要因素忽略，而突出主要因素，从而使问题的计算变得比较简单，而且对问题的精确度也影响不大。这种突出主要因素而忽略次要因素的简单化模型，在物理学中称之为理想模型。它是一种抽象的与真实模型有一定差别，但又非常接近真实模型的一种假想的模型。在流体力学中，理想流体就是这种理想化的模型。

理想流体是指不可压缩又没有粘性的流体。不可压缩，则流体在流动过程中和与物体相互作用时，体积和密度都不发生变化。没有粘性，则流体流动时各流层之间就没有摩擦力，没有摩擦力也就没有切向力，因此，流体与光滑物体接触面之间也就没有摩擦力。这实际上只是一种理想化的模型，因为任何流体，无论是液体还是气体，都有或大或小的粘性和可压缩性，完全没有粘性和可压缩性的流体是不存在的。只是有的流体虽然有粘性，但粘性很小，虽然可压缩，但在一定条件下可压缩性也很小，粘性和可压缩性对讨论问题的影响可以忽略不计，这种流体就可视为理想流体。

2. 把水和空气视为理想流体

地球周围都是空气，地球表面上百分之七十的是水，人类的活动都是在空气或水中进行，因此，空气和水是与人类关系非常密切，对人类活动影响最大的两种流体。本书涉及到的流体主要就是空气和水，流体与物体的作用也是指空气和水与物体的作用。空气和水都有一定的粘性和可压缩性，但在一定的条件下空气和水的粘性和可压缩性都是可以忽略的。

其中水的粘性系数随温度的升高而减小，当温度 $t = 0^0C$ 时，粘性系数 $\eta = 1.793 \times 10^{-3}Ns/m^2$，当温度 $t = 20^0C$ 时，粘性系数为 $\eta = 1.002 \times 10^{-3}Ns/m^2$，而空气的粘性系数则随温度的升高而增加，当温度 $t = 20^0C$ 时，粘性系数为 $\eta = 18.192 \times 10^{-6}Ns/m^2$ 。可见，空气和水的粘性系数都很小，在讨论空气和水与物体的相互作用时，空气和水对物体表面的摩擦力与迎面碰撞力和压差力相比，可以忽略不计。因此，在讨论空气和水与物体之间的相互作用时，可以把空气和水看作是没有粘性的流体。另外，水的可压缩性也很小，一般情况下也可以视为不可压缩的流体。空气的可压缩性比较大，但这是针对密闭容器里不可流动的空气而言，如果是非密闭容器或开阔空间里的空气，由于空气很轻，当其受到沿某一方向的外力作用时，它会很快地流动而不受压缩，从而保持体积和密度不变或变化很小。因此，在一定条件下，空气也可以视为可压缩性很小的流体，并且可以忽略不计。既然在一定条件下，空气和水的粘性和可压缩性都很小，在实际计算中均可忽略不计，那么，在讨论水和空气与物体的作用力时，就可以把水和空气视为理想流体。因此，在本书里凡涉及到水和空气时，都是把水和空气当成理想流体，不再另作说明。

3. 理想流体的稳流模型

一般情况下，流体的速度是不稳定的，既是时间的函数又是空间的函数，如（1-1）式的形式。但如果在一定的时间里流体流过任一截面的流量是相同的，即流体到达截面的速度与时间无

关，只是空间的函数，则（1－1）式变为

$$u = u(x, y, z) \tag{1-2}$$

（1－2）式为流体流过任一截面的速度，对于时间而言，它是常数，但对于空间而言，不仅是不同的截面上速度不同，而且是同一截面上不同点的速度也不同。这是因为考虑到流体有粘性的原因，由于有粘性，流层与流层之间有摩擦力，流体与管壁或河床面之间也有摩擦力，因此，流体在管中流动时，越接近管壁速度越小，越远离管壁速度越大，在管的轴线上速度最大。

但对于理想流体，粘性系数为零，摩擦力也为零。因此，流体流动时，流层与流层之间以及流体与管壁之间都没有切向力。没有切向力，流层与流层之间就没有相互影响，流体与管壁之间也没有相互影响，流体流到同一横截面上的速度处处相等。所以，当流体沿 x 轴向运动时，流体在不同的位置上速度可以不相同，但在同一位置的横截面上则速度是相同的，因此，（1－2）式就简化为

$$u = u(x) \tag{1-3}$$

（1－3）式给出，当理想流体作稳恒流动时，流体的速度可以是位置的函数（如水在粗细不同的管子里流动时的情形），但在同一位置的截面上流体的速度处处相同，并与时间无关。如果理想流体是在平直并粗细均匀的光滑管子里流动，当流进和流出管子的流量相等时，则流体在整个管子里作稳恒流动，速度处处相等，即与时间和空间都没有关系，而是一个常数，用 u_0 表示，有

$$u = u_0 \tag{1-4}$$

综合以上讨论得出，当理想流体作稳定流动时，由于流层与流层之间没有切向力，流层与光滑管壁之间也没有切向力，因此，流层与流层之间互不影响，各流层之间或各流体质点之间的运动都是彼此独立的。既然各流层之间或各流体质之间的运动是彼此独立的，互不影响，那么，在相同条件下它们的运动状态就是相同的，即各流体质点都以相同的速度运动，并以相同的速度通过同

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.co

一横截面。如果管子粗细均匀，各横截面积相等，则流体流过每个横截面的速度都是相同的，因此，整个管子里的速度都是相同的，为一个常数。这就是理想流体的稳定流动模型。

§1－2　与物体作用的流体质量和动量

在研究流体与物体之间的相互作用时，必然要涉及到作用双方的质量和动量问题。由于物体的体积是确定的，并在运动中保持不变，所以物体的质量和动量容易确定，下面主要是讨论与物体发生作用的流体质量和动量问题。

一、与物体相遇的流体质量

当物体与流体之间有相对运动时，物体必然要与流体相遇而发生作用，即运动的物体要受到流体的阻力，或者流过物体的流体要受到物体的阻力。阻力有迎面碰撞阻力和压差阻力，迎面碰撞阻力的大小与单位时间和物体迎面相遇的流体质量有关。为此，我们先讨论与物体相遇的流体质量问题。当流体流动时，流体的形状和体积都无法确定，因此，质量也无法确定。但是，流体的流量是明确的，我们就从流量的定义入手来讨论与物体前表面相遇的流体质量问题。

1. 质量流量元模型

流量是单位时间垂直流过某一横断面的流体的量，如果该流量是指体积，则称为“体积流量”，如果是指质量，则称为“质量流量”。这里的横断面是任意的，可以是整个管导或河道的横断面，也可以是其中任意大小的垂直或倾斜来流的平面。设流动流体内有一固定并垂直来流的平面，面积为 s，流体流到 s 面的速度为 u，大小恒定，则有单位时间流到 s 面的流体流量为

$$Q = su$$

如果该流量是表示体积，则单位时间流到 s 面的流体体积为

$$\tau = Q = su$$

如果是表示质量，则单位时间流到 s 面的流体质量为

$$m = \rho\tau = \rho su \tag{1-5}$$

由以上关于流量的定义看出，流体的流量，不论是体积流量还是质量流量，都与流体流到 s 面的速度成正比，而速度是单位时间流体流过 s 面的长度。又因为时间（包括单位时间）是物质运动的持续过程，所以流量是流过 s 面的微小流体量的时间积累，流量的得出也需要一个持续过程。如果选择的时间不是单位时间，而是微小时间元 dt，则该微小时间里垂直流到 s 面的流体体积为

$$d\tau = sudt = sdl \tag{1-6}$$

这就是流体在微元时间里垂直流到 s 面的流体体积，定义为流体的体积流量元。式中 s 为流体垂直流过的平面，dl 为流体在微元时间里流过 s 面的长度。因为时间取得很小，趋于零，所以长度 dl 也趋于零。故有以 s 为底 dl 为高的体积流量元是一个宏观薄微观厚的小薄层，在宏观上它的体积趋于零，但在微观上它却包含了许多的流体分子或流体质点。由于体积流量元是一个很薄的小薄层，所以小薄层里的所有流体分子都可以看作是同时到达 s 面上。由体积流量元得出质量流量元为

$$dm = \rho d\tau = \rho sudt \tag{1-7}$$

这就是流体在微元时间里垂直流到 s 面的流体质量，定义为质量流量元。如果流体中的平面 s 不是垂直于来流，而是与来流之间有一个夹角 θ，则微元时间里垂直流过 s 面的质量流量元为

$$dm = \rho su\lim\theta dt \tag{1-8}$$

由上式看出，质量流量元不仅与平面的面积和流体速度有关，而且与平面放置的方位有关。

2. 与物体垂直相遇的流体质量计算

物体在流体中与流体之间有相对运动时，无论是物体相对于流体的运动还是流体相对于物体的流动，物体前端表面都要与流体相遇而发生碰撞，而与物体发生碰撞的流体只是垂直物体前表面的部分，即为流体在前表面上的法线分量。与物体相遇并发生碰撞的流体质量可直接由（1-7）式或（1-8）式算出。设物体

不动，而是流体以定常速度 u 流向物体，并物体的前端表面为平面，面积为 s，s 面与来流的夹角为 θ，则由（1－8）式求出任意时间垂直流到 s 面的流体质量为

$$m = \int_0^t \rho su \lim\theta dt = \rho sut \lim\theta \qquad (1-9)$$

（1－9）式就是任意时间垂直流到 s 面并与之发生碰撞的流体质量。式中流体的密度和流速以及物体前表面与来流的夹角都是常数，积分只是针对时间。当时间为 1 秒时，就是单位时间垂直流到 s 面的流体质量，也就是流到 s 面上质量流量。流体流到物体前表面的质量流量的大小决定着流体与物体迎面碰撞力的大小，由（1－9）式得出流体流到物体前表面的质量流量为

$$m = \rho su \lim\theta \qquad (1-10)$$

由上式看出，单位时间流到物体前表面的流体质量与流体的密度和流速成正比，与物体前端表面的面积成正比，并与前表面跟来流的夹角有关。当 $\theta = 90^0$，即物体前表面正对来流时，单位时间流体垂直流到物体前表面的质量最大，即质量流量最大，为

$$m = \rho su \qquad (1-11)$$

由（1－10）式看出，单位时间流到物体前表面的流体质量与前表面的面积 s 成正比，如果物体前表面为平面，则前表面与来流的夹角为常数，$\lim\theta$ 对 s 面为常数，（1－10）式成立。但如果物体前表面为光滑曲面，如半球面和半圆柱面等，此时，物体前表面与来流的夹角不再是常数，而是变数，（1－10）式对整个 s 面不成立。但对 s 面上的任意面元成立，即（1－10）式可表示为

$$dm = \rho u \lim\theta ds$$

上式为单位时间流到物体前表面上任意面元 ds 上的流体质量，θ 是任意面元 ds 与来流 u 的夹角，它对面元而言是常数，但对整个物体前表面而言是变数。故单位时间垂直流到物体前表面的流体质量可直接对上式作面积分求出，有

$$m = \rho u \int_{s} \lim\theta ds \tag{1-12}$$

积分区域为物体的前表面。如果物体的前表面为光滑平面，则（1－12）式就可简化成（1－9）式，即（1－9）式只是（1－12）式的特殊情况。下面由（1－12）式计算出光滑圆柱体横向静止在流动流体中时，单位时间流到圆柱前表面的流体质量。设圆柱体长为l，半径为R，横向静止在流体中，流体以速度u流向圆柱前表面。在圆柱前表面上任取面元 $ds = lRd\theta'$，θ' 为面元 ds 法线与来流u的夹角，与 θ 互为余角，即 $\theta = \frac{\pi}{2} - \theta'$，代入（1－12）式有

$$\begin{aligned} m &= \rho u \int_{s} \lim\theta ds \\ &= \rho u \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \lim\left(\frac{\pi}{2} - \theta'\right) lRd\theta' \qquad (1-13) \\ &= \rho Rlu \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta' d\theta' = 2\rho Rlu = \rho s_m u \end{aligned}$$

这就是单位时间垂直流到滑圆柱体前端半圆柱面的流体质量，式中 ρ 是流体密度，s_m 是圆柱体垂直来流的最大截面积。用同样的方法容易算出单位时间垂直流到光滑球体前表面的流体质量为

$$m = \pi R^2 \rho u = \rho s_m u \tag{1-14}$$

以上讨论的是物体静止在流动流体中的情形，即流体流过静止物体的情况。如果不是流体流过物体，而是物体在静止流体中运动，同样能够确定与物体相遇的流体质量。物体在流体中运动时，物体前表面遇到的流体就是物体运动过程中排开过的流体，也就是物体在运动过程中走过的轨迹里的流体，其体积就是以物体垂直运动方向的最大截面为底，以物体走过的路程为高决定的体积。如果是指单位时间，则物体走过路程就是物体的运动速

度，用 v 表示，故有单位时间与物体前表面相遇的流体质量为

$$m = \rho\tau = \rho s_m v \tag{1-15}$$

（1－15）式就是物体在静止流体中以速度 v 运动时，每单位时间里物体前表面碰到的流体质量。s_m 为物体垂直运动方向的最大截面，因此，对于不同的物体取不同的值。如果是方块物体，则物体的最大截面就是方块物体的前端表面，如果是球体，则球体垂直运动方向的最大截为 $s_m = \pi R^2$，如果是圆柱体作横向运动，则 $s_m = 2Rl$，R 和 l 为圆柱体的半径和长度。

由以上讨论得出，只要物体在流体中与流体之间有相对运动，无论是物体相对于流体的运动还是流体相对于物体的流动，与物体前表面垂直相遇的流体质量都与相对速度成正比。由此得出，当物体和流体都在运动时，物体前表面遇到的流体质量与它们的相对速度成正比。如物体在河水中作顺流运动时，若物体的速度 v 大于河水的速度 u，则物体相对于河水的速度为 v－u，物体在运动过程中每单位时间遇到的河水质量可直接由（1－15）式 v 换成 v－u 得出为

$$m = \rho s_m (v - u) \tag{1-16}$$

由（1－16）式看出，当物体的速度与河水的速度相等时，物体相对于河水的速度为零，物体前表面遇到的河水质量也为零。式中物体沿垂直运动方向的最大截面 s_m 与（1－15）式相同。

二、与物体垂直相遇的流体动量

在物体的机械运动中，物体的动量定义为物体的质量与速度的乘积，它是描述物质机械运动状态的一个重要物理量。当物体之间发生动量传递和转移时，物体之间就有相互作用和作用力。流体是物质，流体的流动也有动量，流体的动量也是流体的质量与速度的乘积。这里我们只讨论能与物体相遇并发生碰撞的流体的动量，这就是物体在流体中与流体之间有相对运动时，物体前表面沿法线方向遇到的流体的动量，它等于物体前表面遇到的流体质量与流体在前表面上法向速度的乘积。而物体前表面遇到流

体质量前面已经给出，流体的速度一般是知道的，因此，与物体垂直相遇的流体动量是可以确定的。当物体静止，而流体流过静止物体时，如果物体前表面为倾斜于来流的平面，则单位时间垂直流到物体前表面的流体质量由（1－10）式给出，故由（1－10）式乘以流体在倾斜平面上的法向速度就是单位时间与物体前表面相遇并发生碰撞的流体动量，为

$$p = mu_n = \rho su^2 \lim{}^2\theta \qquad (1-17)$$

式中 θ 为物体前表面与来流的夹角，$u_n = u\lim\theta$ 为流体在物体前表面上的法向速度。同样可以求出物体前表面为曲面时与物体相碰的流体动量，在以后的章节里作出讨论。如果是流体静止，而物体在静止流体中运动，速度为 v，并物体的前表面仍为倾斜来流的平面。则由相对性原理，单位时间与物体前表面相遇并发生碰撞的流体动量可直接由（1－17）式写出为

$$p = \rho sv^2 \lim{}^2\theta \qquad (1-18)$$

如果物体的前端表面不是倾斜于运动方向，而是垂直于运动方向，如正方体和长方体等物块在河水中以一个面垂直运动方向时，上式中的 $\theta = 90^0$，(1－18）式为

$$p = \rho sv^2 \qquad (1-19)$$

（1－19）式就是运动物体前表面为垂直运动方向的光滑平面时，单位时间与物体前表面垂直相遇的流体动量，大小就等于流体对物体的迎面碰撞力。

由以上讨论得出，流动的流体虽然没有确定的体形和质量，但由于流体流量的定义是明确的，故由流体流量的定义入手就可以算出与物体垂直相遇的流体质量和动量，进而可以求出流体与物体之间有相对运动时的迎面碰撞力。

例：设静水中有一光滑的平板面物体，面积为 1 平方米，在外力作用下以每秒 2 米的速度作匀速水平运动。试求：（1）当平板面与运动方向的夹角为 30^0 时，每单位时间与平板面垂直相遇并发生碰撞的水的质量和动量是多少？（2）当平板面垂直运动方

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com