

物体在流体中运动时所受的阻力例析

□ 孙晓飞

(浙江省富阳中学, 浙江富阳 311400)

一、问题研究的缘由

在中学物理习题中, 有不少题涉及物体在流体(主要是空气和水)中运动时所受的阻力计算公式, 有些题中给出阻力大小与速度成正比, 有些与速度的平方成正比, 有些与速度的立方成正比, 是命题不够严谨, 还是我们对流体阻力了解得不够?

如图 1 所示, 两个球质量相同, 表面光滑的高尔夫球和布满小坑的“麻脸”高尔夫球, 获得相同初速度的情况下, “麻脸”球能飞 200 米, “光脸”球只

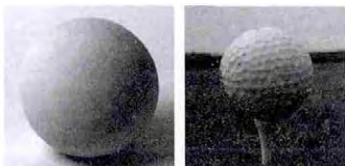


图 1

能飞 40 米。为什么其貌不扬的“麻脸”球飞行远得多?

书本上有关物体所受流体阻力的

题目频繁出现, 生活中因为流体阻力导致的现象趣味十足却又匪夷所思, 引发我们对流体力学的思考, 这也是我们要深入探讨流体阻力的原因。

二、理论支撑下的高中习题例析

从阿基米德研究流体浮力到现在的两千多年中, 科学工作者对流体做了系统而深入的研究, 现在流体力学已发展成为基础科学体系的一部分。流体是液体和气体的总称, 组成流体的分子无固定平衡位置, 且不断地做热运动, 它的基本特征是没有固定的形状和具有流动性。高中阶段我们多次接触了理想流体, 同时也对实际流体有所涉及。

1. 理想流体

理想流体是指不可压缩、没有黏滞性的流体, 是理想化模型。但在一些实际问题中, 由于物体所受的黏滞力比其他力小得多, 这样的流体就可视为理想流体。以小球在空气中落体运动为例, 由于空气的黏滞性, 小球表面有一层很薄的空气附着在小

球上相对于小球静止, 而这层空气与外层的空气间具有相对运动发生摩擦, 这就表现为气体对物体的黏滞阻力。如果黏滞阻力比重力小得多, 阻力就可以忽略不计, 把落体运动视为自由落体, 把实际流体当成理想流体。类似的理想化模型如平抛运动、单摆等, 都是物体在理想流体中的运动情况, 忽略流体对运动物体的阻碍作用。

2. 实际流体

在实际生产生活中, 我们接触更多的是实际流体, 即不能忽略流体的黏性。如空气中雨滴下落时受到的阻力(如果忽略空气阻力, 雨滴从几千米高空落下来其速度接近冲锋枪子弹速度), 汽车在行驶时受到空气阻力, 人在游泳时受到水的阻力, 血细胞在血浆中下沉时受到阻力等等, 都要考虑物体在实际流体中所受阻力情况。在《力学》教程^[1]中有个例子, 某加农炮弹速度大, 不计空气阻力, 射程能够到达 46km, 实际只能到达 13km, 这时空气阻力的作用就很大, 不能忽略。河流中心的水流动较快, 而靠近岸边的水却几乎不动, 这也是由于流体的黏性所致。根据阻力的成因, 我们把平时经常接触到的流体阻力进行分类。

(1) 实际流体中的黏滞阻力(阻力大小与运动速度成正比)

例 1 (2003 年全国高考题) 当物体从高空下落时, 空气阻力随速度的增大而增大, 因此经过一段距离后将匀速下落, 这个速度称为此物体下落的终极速度。已知球形物体速度不大时所受的空气阻力正比于速度 v , 且正比于球半径 r , 即阻力 $f = kv r$, k 是比例系数, 对于常温下的空气, 比例系数 $k = 3.4 \times 10^{-4} \text{Ns/m}^2$, 已知水的密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 取重力加速度 $g = 10 \text{m/s}^2$, 试求半径 $r = 0.10 \text{mm}$ 的球形雨滴在无

风情况下的终极速度 v_r 。

分析验证:小物体在流体中缓慢运动时,所受阻力以黏性阻力为主。著名的斯托克斯公式可以计算球形小物体在空气中低速运动时所受的黏性阻力 $f=6\pi\eta vr$ 其中 r 为球体半径, v 为球体运动速度, η 为黏滞系数。因此这个表达式实际上就是高考题中的阻力 $f=kvr$ 。参考相关资料得到关于不同温度下不同流体的黏滞系数,如表 1。20℃时空气的黏滞系数为 $\eta=1.81\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,代入得 $k=6\pi\eta=3.41\times 10^{-4}\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$,与高考题中给出的数据相符。

表 1 常见流体的黏滞系数 $\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$ [2]

名称	温度	黏滞系数	名称	温度	黏滞系数
水	0℃	1.792×10^{-3}	空气	0℃	1.71×10^{-5}
水	10℃	1.308×10^{-3}	空气	10℃	1.78×10^{-5}
水	20℃	1.005×10^{-3}	空气	20℃	1.81×10^{-5}
汽油	20℃	0.31×10^{-3}	血浆	37℃	$1.0\sim 1.4\times 10^{-3}$
甘油	20℃	14.91×10^{-3}	血液	37℃	$2.0\sim 4.0\times 10^{-3}$
润滑油	60℃	4.17×10^{-3}	水银	20℃	1.55×10^{-3}

实际的雨滴下落问题往往更加复杂,根据雨滴体积大小不同,空气阻力产生机理也发生变化,毛毛细雨固然满足斯托克斯公式,但对于较大雨滴发生落体运动时,空气阻力中压差阻力会取代黏滞阻力占据主导地位,阻力大小与速度的平方成正比。后面会详细分析,在此不做赘述。

另外斯托克斯公式也适用于小球在黏性较大的流体中缓慢运动的情况,例如下面这个题目。

例 2 测定患者的血沉,在医学上有助于医生对病情做出判断。设血液是由红血球和血浆组成的悬浮液,将此悬浮液放进竖直放置的血沉管内,红血球便会在血浆中匀速下沉,其下沉速率称为血沉。某人的血沉 v 的值大约是 $10\text{ mm}/\text{h}$,如果把红血球近似为半径为 R 的小球,且认为它在血浆中下沉时所受的黏滞阻力为 $f=6\pi\eta rv$ 。在室温下, $\eta\approx 1.3\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,已知血浆的密度 $\rho_0\approx 1.0\times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$,红血球的密度 $\rho\approx 1.3\times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 。试由以上数据估算红血球半径的大小。

本题中虽然流体的黏滞系数较大,但是由于物体较小,且运动速度极缓慢仅为 $10\text{ mm}/\text{h}$,所以阻力仍可用斯托克斯公式加以计算,即物体所受的阻力与速度成正比。在此计算过程省略。

综上所述,所有物体在流体中运动时都会受到

黏滞阻力,阻力大小与速度成正比。斯托克斯公式是计算黏滞阻力的一个特例,它的适用对象是小球。与我们平时接触的固体间滑动摩擦阻力有所不同,固体间的滑动摩擦阻力大小与接触面上的相对速度大小无关,而流体阻力与速度大小有关。

(2)实际流体中的压差阻力(阻力大小与运动速度的平方成正比)

当物体在流体中运动时,流体会被物体分开,如图 2 所示,流体从物体的侧面流过,在物体的后侧形成“半真空”地带,离物体较远处的流体将向这个“半真空”地带补充,出现图中所示的湍流。此时物体前后两部分流体对

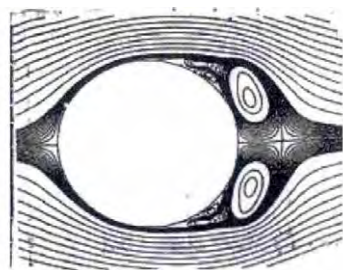


图 2 压差阻力微观原理

物体的压强不同,使得物体运动受阻,这种阻力称为压差阻力。在理论力学中所说的“物体运动时受到空气与速度二次方成正比的阻力”,指的就是空气对物体的压差阻力。压差阻力的大小与物体运动速度的平方成正比 $f=kv^2$, k 为压差阻力系数,与下落物体的形状、流体的黏滞系数等均有关。

例 3 跳伞运动员从跳伞塔上跳下,当降落伞全部打开时,伞和运动员所受的空气阻力大小跟下落速度的平方成正比,即 $f=kv^2$,已知比例系数 $k=20\text{ kg}/\text{m}$,运动员和伞的总质量 $m=72\text{ kg}$,设跳伞塔足够高,且运动员跳离塔后即打开伞(g 取 $10\text{ m}/\text{s}^2$)。求跳伞员最后下落速度多大?

分析验证 运动员下落时受到空气的黏滞阻力和压差阻力共同作用。近似把人和伞看成球模型,用斯托克斯公式 $f_1=k_1rv$ 计算黏滞阻力,用 $f_2=kv^2$ 计算压差阻力。经比较发现:压差阻力系数 $k=20\text{ kg}/\text{m}$ 远大于黏滞阻力比例系数 $k=6\pi\eta=3.4\times 10^{-4}\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$,因此忽略黏滞阻力只考虑压差阻力。当运动员匀速下落时,收尾速度 $v_m=\sqrt{mg/k}=6\text{ m}/\text{s}$ 。

值得注意的是,压差阻力系数 k 与下落物体的形状有关,题中比例系数 $k=20\text{ kg}/\text{m}$ 适用于背着降落伞的运动员这样的形状,假如运动员没有被降落伞包,即下落物体的形状发生改变,其压差阻力系数也相应发生改变。参考相关资料可知没有打开降落伞包时空气的压差阻力系数 $k'=0.24\text{ kg}/\text{m}$,

同课为何会异构*

——以高中物理“功”的概念教学为例

□ 汤家合

(南京师范大学附属扬子中学, 江苏南京 210048)

最近, 我校 D 老师和安徽 W 老师在安徽某重点中学就人教版高中物理必修②第 7 章第 2 节“功”进行了同课异构的课堂展示。两位老师分别来自所在省的重点中学, 均为一级教师, 有着差

不多的教龄; 授课对象均为某校的高一年级实验班, 授课班级原授课老师为同一人。两位老师基于相同的“课标”和教材, 面对着同层次的授课对象, 但对教材的处理、重难点的把握和教学的效果等

可以计算运动员没有打开降落伞下落的收尾速度 $v_m = \sqrt{mg/k'} \approx 53.5\text{m/s}$, 以这样的速度落地是非常危险的。

综上所述, 如果流体中运动的物体体积较大同时速度较大, 那么我们可以忽略黏滞阻力而只考虑压差阻力。现在我们可以应用压差阻力的知识, 解释本文开头提出的有关高尔夫球的疑问了, 当球体在空气中前进时, 空气被球体分开从侧面流过, 气流在球体的前后面产生一个压强差, 这便是压差阻力。“麻脸”高尔夫球使了雕虫小技, 表面的这些小坑让气流从侧面流过时形成的很多小涡流, 从而减小湍流来减小压差阻力。这样“麻脸”高尔夫球就飞得很远了, 但是“光脸”高尔夫球做不到这些。另外, 著名的鲨鱼皮泳衣的研制也是对压差阻力原理的一次实际应用, 如图 3 所示, 科学家发现鲨鱼的皮肤非常粗糙, 表面排列着无数细小的“V”形“皱褶”。



鲨鱼皮表面结构



仿生“鲨鱼皮”材料表面结构图 3

当水分子沿着这些棘齿流过时, 产生无数微小的涡流, 从而减少压差阻力, 使得鲨鱼能快速地在水中前进。完全仿照鲨鱼皮结构设计的泳衣材料, 能引导身体周围的水流更高效地流过, 从而减小阻力。

(3) 实际流体中的兴波阻力(阻力大小与运动速度的立方成正比)

当物体在流体中高速运动时, 例如超音速飞机、火箭、步枪的子弹等物体在高速运动时, 受到的流体阻力与运动速度的立方成正比, 我们称之为兴波阻力。物体损失的机械能以机械波的形式向外传递和扩散, 兴波阻力产生的机理非常复杂, 在此不做深入讨论。

以上我们讨论了基本的流体阻力知识, 了解流体阻力产生的原因, 至于阻力系数的测定、如何改变流体阻力等等, 例如汽车在形状设计时采用流线型车身来减小压差阻力系数等, 这是空气动力学要讨论的非常重要的内容, 这也是一门非常有挑战的学科。笔者知之甚少, 借以本文, 希望抛砖引玉。

参考文献:

- [1] 漆安慎, 杜焯英. 力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [2] 周光炯. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

* 本文是江苏省教育科学“十二五”重点资助课题《知情交融·学校教学质量优化的新探索》(批准号 B-a/2013/02/028)的阶段研究成果。