**14-1流体,密度和压力** 2021年5月18日11点33分

**什么是物理？**

流体物理学是水利工程学的基础,水利工程学是工程学的一个分支,已在许多领域中得到应用.核工程师可能会研究衰老的核反应堆液压系统中的流体流动,而医学工程师可能会研究衰老患者的动脉中的血液流动.环境工程师可能会担心废料场的排水或农田的有效灌溉.海军工程师可能会担心深海潜水员面临的危险,也可能会担心船员可能会从被击落的潜水艇中逃脱.航空工程师可能会设计液压系统来控制机翼襟翼,从而使喷气式飞机降落.液压工程还应用在许多百老汇和拉斯维加斯的表演中,在这些表演中,液压系统可以快速放置和放下大量设备.

在研究流体物理学的任何此类应用之前,我们必须首先回答“什么是流体？”这个问题.

**什么是流体?**

与固体相反,**流体**是可以流动的物质.流体符合我们放置容器的边界.之所以这样,是因为流体无法承受与其表面相切的力.(在模块12-3的更正式的语言中,流体是一种流动的物质,因为它不能承受剪切应力.但是,它可以在垂直于其表面的方向上施加力.)一些材料,例如沥青,需要很长时间才能符合容器的边界,但最终还是要遵循;因此,我们甚至将那些材料归类为流体.

您可能想知道为什么我们将液体和气体混在一起并称其为流体.毕竟(您可能会说),液态水与蒸汽的区别与与冰不同.其实不是.像其他晶体固体一样,冰的组成原子也组织在称为晶体晶格的相当刚性的三维阵列中.但是,无论是蒸汽还是液态水,都没有这种有序的远距离布置.

**密度和压力**

在讨论刚体时,我们会关注特定的物质块,例如木块,棒球或金属棒.我们发现有用的物理量是质量和力,用牛顿的定律表达这些物理量.例如,我们可以说是受到25N力作用的3.6千克重块.

对于流体,我们对扩展物质以及该物质中随点变化的特性更感兴趣.讲**密度**和**压力**比讲质量和力有用.

**密度**

为了找到流体在任何点的密度,我们在该点附近隔离一个小体积元素并测量该元素中包含的流体的质量.密度是

从理论上讲,流体中任何一点的密度都是该比率的极限,因为该点处的体积元素越来越小.实际上,我们假设流体样本相对于原子尺寸而言较大,因此是“平滑的”(具有均匀的密度),而不是原子的“块状”.这个假设使我们可以根据样品的质量和体积来写密度:

密度是标量性质;其国际单位制为千克/立方米.表14-1列出了某些物质的密度和某些物体的平均密度.请注意,气体的密度(请参阅表中的空气)随压力变化很大,而液体的密度(请参见水)则没有变化.也就是说,气体容易压缩,而液体则不容易压缩.

**压力**

如图14-1a所示,让一个小的压力传感装置悬挂在充满液体的容器内.传感器(图14-1b)由一个表面积为的活塞组成,该活塞骑在一个紧密配合的气缸中并靠在弹簧上.读数装置使我们能够记录(校准的)弹簧被周围流体压缩的量,从而指示垂直于活塞的力的大小.我们将活塞上的**压力**定义为

从理论上讲,流体的任何一点的压力都是该比率的极限,因为以该点为中心的活塞的表面积越来越小.但是,如果力在平面区域上是均匀的(它在区域的每个点上均匀分布),则可以将公式14-3写成:

其中是作用在区域上的法向力的大小.

通过实验我们发现,在静止流体的给定点上,无论压力传感器的方向如何,由公式14-4定义的压力都具有相同的值.压力是标量,没有方向性.确实,作用在压力传感器的活塞上的力是矢量,但是公式14-4仅涉及该力的大小,即标量.

SI的压力单位是每平方米牛顿,它有一个特殊的名称,帕斯卡(Pa).在公制国家/地区,轮胎压力表的校准单位是千帕.帕斯卡与其他一些常见的(非SI)压力单位相关,如下所示:

顾名思义,大气压(atm)是海平面上大气的近似平均压力.托尔(以1674年发明水银气压计的Evangelista Torricelli命名)以前称为汞毫米(mm Hg).每平方英寸的磅数通常缩写为.表14-2显示了一些压力.

**14-2 静止的流体** 2021年5月18日12点05分

图14-2a显示了一个向大气开放的水或其他液体的储罐.每个潜水员都知道,压力随着在空气-水界面以下的深度而增加.实际上,潜水员的深度计是一个压力传感器,非常类似于图14-1b所示.每个登山者都知道,压力随着海拔的升高而下降.潜水员和登山者遇到的压力通常称为静水压力,因为它们是由静态(静止)流体引起的.在这里,我们想找到静水压力作为深度或高度的函数的表达式.

首先,让我们看一下水深以下的压力随深度的增加.我们在水箱中设置了一个垂直的轴,其原点在空气-水界面处,并且正方向向上.接下来,我们考虑一个包含在水平基部(或表面)区域A的假想右圆柱中的水样,使得和(均为负数)分别是上下圆柱面的表面以下的深度.

图14-2e是缸中水的自由图.水处于静态平衡;也就是说,它是静止的,其上的力平衡.三个力垂直作用在其上:力作用在圆柱体的顶部表面,并且是由于圆柱体上方的水所致(图14-2b).力作用在圆柱体的底表面,并且归因于圆柱体正下方的水(图14-2c).对水的重力为,其中为圆柱体内水的质量(图14-2d).这些力的平衡写为

为了涉及压力,我们使用公式14-4来写

根据公式14-2,柱体内水的质量为,其中圆柱体的体积是其表面积与高度的乘积.因此,等于.将其和公式14-6代入公式14-5,我们发现

或

该方程式可用于寻找液体(作为深度的函数)和大气(作为高度或高度的函数)中的压力.对于前者,假设我们在液面以下的深度寻找压力.然后,我们选择1级为表面,2级为其下的距离h(如图14-3所示),代表表面上的大气压.然后我们替代

进入公式14-7,变为

注意,液体中给定深度的压力取决于该深度,而不取决于任何水平尺寸.

**处于静态平衡状态的流体中某一点的压力取决于该点的深度,而不取决于流体或其容器的任何水平尺寸**.

因此,无论容器的形状如何,公式14-8都成立.如果容器的底面位于深度,则公式14-8给出那里的压力.

在公式14-8中,将称为级别2的总压力或**绝对压力**.要查看原因,请注意在图14-3中,级别2的压力包含两个贡献: (1),(2),是高于液位2的液体所产生的压力,而液位下降到2级.通常,绝对压力与大气压之间的差称为**表压**(因为我们使用表来测量该压差).对于图14-3,表压为.

公式14-7在液体表面之上依然成立:给出了高于水平1的给定距离的大气压力,相对于水平1的大气压力(假设大气密度在该距离上是均匀的）.例如,要找到图14-3中距离水平1上方d处的大气压,我们用

与结合,我们得到

**14-3 测量压力** 2021年5月18日12点15分

**水银气压计**

图14-5a显示了非常基本的水银气压计,一种用于测量大气压力的装置.如图所示,长玻璃管装满了水银,并将其开口端倒入一水银盘中.汞柱上方的空间仅包含汞蒸气,该汞蒸气在常温下的压力很小,因此可以忽略不计.

我们可以使用公式14-7用汞柱的高度来找到大气压.如图14-5a所示,我们选择图14-2的级别1为空气-汞界面的界面,选择级别2为汞柱顶部的界面.然后我们代入

到公式14-7,找到

对于给定的压力,水银柱的高度不取决于垂直管的横截面积.图14-5b的水银晴雨表给出的读数与图14-5a相同.唯一重要的是汞含量之间的垂直距离h.

公式14-9表明,对于给定的压力,汞柱的高度取决于气压计位置的值以及汞的密度,汞的密度随温度而变化.仅当气压计处于的可接受标准值为且汞的温度为0°C的位置时,柱的高度(以毫米为单位)才等于压力(以torr为单位).如果这些条件不存在(很少发生),则必须先进行少量校正,然后才能将汞柱的高度转换成压力.

**敞开式压力计**

开管压力计(图14-6)测量气体的表压.它由一个装有液体的U形管组成,该管的一端连接到我们要测量其表压的容器,另一端通向大气.我们可以使用公式14-7来找到如图14-6所示的高度的表压.让我们选择级别1和2,如图14-6所示.和

代入到公式14-7,我们得到

其中是液体的密度.表压与成正比.

表压可以为正压或负压,具体取决于还是.在充气轮胎或人体循环系统中,(绝对)压力大于大气压力,因此表压为正值,有时也称为过压.如果您用吸管吸吮以将液体从吸管中吸起,则肺中的(绝对)压力实际上小于大气压.这样,肺部的表压就为负值.

**14-4帕斯卡原理** 2021年5月18日13点35分

当您挤压一根管子的另一端挤出牙膏时,您正在观察Pascal的工作原理.这个原理也是Heimlich动作的基础,在Heimlich动作中,适当施加到腹部的急剧压力增加被传递到喉咙,有力地排出了积存在那里的食物.布莱斯·帕斯卡(Blaise Pascal)在1652年首次明确阐明了这一原理(为之指定了压力单位):

**施加在封闭的不可压缩流体上的压力变化不会减弱地传递到流体的每个部分及其容器的壁上**.

**展示帕斯卡原理**

如图14-7所示,考虑不可压缩流体包含在高圆柱体内的情况.气缸上装有一个活塞,一个铅丸容器可放置在该活塞上.大气,容器和喷丸会在活塞上施加压力,从而在液体上施加压力.则液体中任意一点的压力为

让我们向容器中添加更多的铅丸,以增加量.公式14-11中的量,和不变,因此处的压力变化为

这种压力变化与无关,因此,正如帕斯卡的原理所指出的,它必须在液体中的所有点上都保持不变.

**帕斯卡原理和液压杆**

图14-8显示了如何使Pascal原理成为液压杆的基础.在运行中,将大小为的外力指向表面积为的左侧(或输入)活塞上.然后,设备中不可压缩的液体会在右侧(或输出)活塞上产生一个大小为的向上力,其表面积为.为了使系统保持平衡,必须从外部负载(未显示)向输出活塞施加一个大小为的向下力.施加在左侧的力和来自右侧的负载的向下力产生液体压力的变化,由下式给出:

因此,

公式14-13表明,如果,则负载上的输出力必须大于输入力,如图14-8所示.

如果我们将输入活塞向下移动距离,则输出活塞向上移动距离,以使相同体积的不可压缩液体在两个活塞上移动.然后

我们可以写成

这表明,如果(如图14-8所示),则输出活塞的移动距离将小于输入活塞的移动.根据公式14-13和14-14,我们可以将输出功写为

这表明,在施加的力作用下,输入活塞上完成的功等于输出活塞上的功.

液压杆的优点是:

**利用液压杆,可以将在给定距离上施加的给定力转换为在较小距离上施加的更大的力**.

力和距离的乘积保持不变,因此可以完成相同的工作.但是,能够施加更大的力量通常具有巨大的优势.例如,即使我们不得不以比汽车上升时高的速度和一系列小行程将手柄泵得更远,我们大多数人也不能直接举起汽车,而可以使用液压千斤顶.

**14-5 阿基米德原理** 2021年5月18日13点49分

图14-9显示了一个学生在游泳池里,他操纵着一个装满水的非常薄的塑料袋(质量可以忽略不计).她发现麻袋及其中的水处于静态平衡状态,既不上升也不下沉.所容纳的水的向下重力必须通过来自袋子周围水的净向上力来平衡.

该净向上力是**浮力**.存在的原因是周围水中的压力随地表以下深度的增加而增加.因此,在袋的底部附近的压力大于在顶部的压力,这意味着由于该压力而在袋上的力在袋的底部附近比在顶部附近大.图14-10a中显示了一些力,其中麻袋占据的空间为空.请注意,靠近该空间底部(具有向上分量)绘制的力矢量的长度要比靠近麻袋顶部（具有向下分量）绘制的力矢量的长度长.如果我们将所有从水中施加到袋子上的力矢量地相加,则水平分量会抵消,而垂直分量会相加,从而在袋子上产生向上的浮力.(在图14-10a中,力显示在池的右侧.)

由于水袋处于静态平衡状态,因此的大小等于作用在麻袋上的重力大小: (下标是指流体,这里是水).换句话说,浮力的大小等于袋子中水的重量.

在图14-10b中,我们用恰好填满图14-10a中孔的石头代替了水袋.据说石头会取代水,这意味着石头会占据原本会被水占据的空间.我们对孔的形状没有做任何改动,因此孔表面的力必须与装满水的麻袋时的力相同.因此,现在作用在充满水的袋子上的向上的浮力作用在石头上.也就是说,浮力的大小等于,即被石头排出的水的重量.

与充满水的麻袋不同,石头不是处于静态平衡状态.石头上的向下重力大于向上浮力(图14-10b).石头因此向下加速,下沉.

接下来,让我们用一块轻质木材准确地填充图14-10a中的孔,如图14-10c所示.同样,孔表面的力没有任何变化,因此浮力的大小仍等于排水量.像石头一样,砌块也不处于静态平衡.但是,这一次重力的大小小于浮力(如水池右侧所示),因此砌块向上加速,上升到水的顶面.

我们对麻袋,石头和砖块的研究结果适用于所有液体,并在**阿基米德原理**中进行了总结:

**当物体完全或部分浸没在流体中时,来自周围流体的浮力作用在物体上.该力指向上方,其大小等于已被物体排出的流体的重量**.

流体种作用在物体上的浮力大小

其中是被物体排出的流体质量.

**漂浮**

当我们在游泳池中的水上方释放一块轻质木材时,该块会移动到水中,因为其上的重力将其向下拉.随着砌块置换越来越多的水,作用在其上的向上浮力的大小增大.最终,足够大,等于块体上向下重力的大小,块体静止.然后,该块处于静态平衡,并且据说漂浮在水中.一般来说,

**当物体漂浮在流体中时,作用在物体上的浮力的大小等于作用在物体上的重力的大小**.

我们可以这样写这个语句:

从公式14-16,我们知道.因此,

**当物体漂浮在流体中时,作用在该物体上的重力的大小等于已被该物体置换的流体的重量**.

我们可以这样写这个语句:

换句话说,浮体取代了其自身的流体重量.

**流体中的表观重量**

如果我们将石头放在经过校准以测量重量的秤上,那么秤上的读数就是石头的重量.但是,如果我们在水下进行此操作,则水对石头的向上浮力会降低读数.那么,该读数就是一个明显的分量.通常,表观重量与物体的实际重量和物体上的浮力有关.

如果经过某种强度的测试,您必须举起沉重的石头,则可以在水下用石头轻松完成它.然后,您的作用力将只需要超过石头的表观重量,而不是更大的实际重量.

漂浮在浮体上的浮力的大小等于浮体的重量.因此,方程14-19告诉我们,浮体的表观权重为零-该浮体将产生一个刻度为零的读数.例如,当宇航员准备在太空中执行复杂的任务时,他们会在水下练习漂浮的任务,并调整其西装使其表观重量为零.

**14-6 连续性方程** 2021年5月18日13点58分

**运动中的理想流体**

实际流体的运动非常复杂,尚未完全了解.取而代之的是,我们将讨论**理想流体**的运动,该流体在数学上更易于处理,但却提供了有用的结果.以下是我们对理想流体所做的四个假设;他们都关心流:

1. **稳流** 在稳定(或层流)流动中,运动流体在任何固定点的速度不会随时间变化.在一条安静的小溪中心附近,水流缓慢而平稳.急流中的流量不是.图14-12显示了对于上升的烟流,从稳定流向不稳定流(或非层流或湍流)的过渡.烟雾粒子的速度随着它们的上升而增加,并且在一定的临界速度下,流量从稳定变为不稳定.
2. **不可压缩流** 对于静止的液体,我们假设理想的液体是不可压缩的.即,其密度具有恒定的均匀值.
3. **无粘性流** 粗略地说,流体的粘度是流体流动的抵抗力的量度.例如,浓稠的蜂蜜比水更耐流动,因此说蜂蜜比水更粘.粘度是固体之间摩擦的流体模拟.两者都是将运动物体的动能转换为热能的机制.在没有摩擦的情况下,砖块可以沿水平面以恒定速度滑动.同样,在非粘性流体中移动的物体不会受到粘性阻力,也就是说,不会因粘性而产生阻力.它可以以恒定的速度通过流体.英国科学家雷利勋爵（Lord Rayleigh）指出,在理想的流体中,船舶的螺旋桨将无法工作,但另一方面,在理想的流体中,船舶(一旦开始运动)将不需要螺旋桨!
4. **无旋流** 尽管它不需要我们进一步关注,但我们还假设流是无旋转的.要测试此属性,请让细小的灰尘粒子随流体一起移动.尽管该测试体可以(或可以不)沿圆形路径移动,但在非旋转流动中,该测试体将不会绕通过其自身质心的轴旋转.打个比方,摩天轮的运动是旋转的.但是乘客是无旋的.

我们可以通过添加示踪剂使流体的流动可见.这可能是将染料注入到液流中的许多点中(图14-13),或者是将烟尘颗粒添加到了气流中(图14-12).示踪剂的每一位都遵循一条流线,这是流体中的微小元素在流体流动时所要经过的路径.**回顾第四章,粒子的速度始终与粒子所走的路径相切.在这里,粒子是流体元素,其速度始终与流线相切(图14-14).因此,两条流线永远不会相交.如果他们这样做了,那么到达他们的交点的元素将同时具有两个不同的速度-这是不可能的**.

**连续性方程**

您可能已经注意到,可以通过用拇指部分关闭软管开口来提高从花园软管流出的水的速度.显然,水的速度取决于水流过的横截面积.

在这里,我们希望导出一个表达式,该表达式将和表示理想流体通过横截面变化的管的稳定流动的情况,如图14-15所示.那里的流向右流动,所示的管段(较长管的一部分)的长度为.流体在该段的左端具有速度,在右端具有.该管在左端具有截面积,在右端具有截面积.假设在时间间隔中,液体体积在其左端进入管段(该体积在图14-15中显示为紫色).然后,由于流体不可压缩,因此必须在该段的右端出现相同的体积 (在图14-15中为绿色).

我们可以使用相同体积来关联速度和面积.为此,我们首先考虑图14-16,该图显示了具有相同横截面积的管的侧视图.在图14-16a中,流体元素即将穿过在管上绘制的虚线宽度.元素的速度为,因此在时间间隔内,元素沿管移动距离.在该时间间隔中通过虚线的流体体积为

将方程14-22应用于图14-15中的管段的左端和右端,我们得到

或

速度与横截面积之间的这种关系称为理想流体流动的**连续性方程**.它告诉我们,当我们减小流体流经的截面积时,流速会增加.

公式14-23不仅适用于实际管道,还适用于任何所谓的流量管道,或边界由流线组成的假想管道.这样的管就像真实的管一样工作,因为没有流体元素可以穿过流线.因此,流管内的所有流体必须保留在其边界之内.图14-17显示了一种流动管,其中横截面积沿流动方向从区域增大到区域.从公式14-23可以知道,随着面积的增加,速度必须降低,如图14-17右侧的流线之间较大的间距所示.同样,您可以在图14-13中看到,在圆柱体的正上方和正下方,流速最高.

我们可以将公式14-23重写为

其中是流体的体积流速(每单位时间超过给定点的体积).其SI单位是立方米每秒().如果流体的密度是均匀的,我们可以将公式14-24乘以该密度,得出质量流量(每单位时间的质量):

质量流量的SI单位是千克每秒().公式14-25表示,每秒流入图14-15的管段的质量必须等于每秒流出该管段的质量.

**14-7 伯努利方程** 2021年5月18日14点25分

图14-19展示一根管子,理想的流体以稳定的速度流过该管子.在一个时间间隔中,假设在图14-19中为紫色的液体进入左端(或输入端),然后在图14-19右(或输出)端为绿色的相同体积出现了.流出的体积必须与进入的体积相同,因为流体是不可压缩的,且密度假定为恒定.

假设和是在左侧进入的流体的高度,速度和压力,而和是在右侧出现的流体的相应量.通过将能量守恒原理应用于流体,我们将证明这些量由下列公式关联

通常,术语被称为流体的**动能密度**(每单位体积的动能).我们还可以将公式14-28编写为

方程14-28和14-29是在1700年代研究流体流动的丹尼尔·伯努利之后的伯努利方程的等价形式.与连续性方程(方程14-24)一样,伯努利方程不是一个新原理,而仅仅是以更适合流体力学的形式重新构造了熟悉的原理.作为检验,让我们通过在方程式14-28中将来将伯努利方程式应用于静止的流体.结果为公式14-7:

如果我们使为常数(例如),以便流体在流动时不会改变高度,则伯努利方程的主要预测就会出现.然后,公式14-28变为

这告诉我们：

**如果流体元素的速度随着其沿着水平流线行进而增加,则流体的压力必须减小,反之毅然**.

换句话说,在流线相对靠近的地方(速度相对较大的地方),压力相对较低,反之亦然.

如果考虑流经各种宽度的管的流体元素,那么速度变化和压力变化之间的联系就很有意义.回想一下,元素在较窄区域中的速度较快,而在较宽区域中的速度则较慢.根据牛顿第二定律,力(或压力)必须引起速度的变化(加速度).当元素靠近狭窄区域时,其后面较高的压力会使其加速,从而使其在狭窄区域中具有较高的速度.当它接近大区域时,它前面的较高压力会使它减速,因此它在大区域中的速度较小.

伯努利方程仅在流体理想的程度上严格有效.如果存在粘性力,则将涉及热能,在此我们将其忽略.

**伯努利方程的证明**

让我们以图14-19中所示的(理想)流体的全部体积为系统.当系统从其初始状态(图14-19a)移动到其最终状态(图14-19b)时,我们将对系统应用能量守恒定律.在此过程中,位于图14-19中隔开距离L的两个垂直平面之间的流体不会改变其特性;在此过程中,流体不会改变其特性.我们只需要关注输入和输出端发生的变化.

首先,我们以功–动能定理的形式应用能量守恒,

这告诉我们,系统动能的变化必须等于在系统上完成的净功.动能的变化是由管子两端之间的速度变化引起的,为

其中()是在很小的时间间隔内进入输入端并离开输出端的流体质量.

在系统上完成的功来自两个方面.质量从输入水平到输出水平的垂直提升过程中,质量流体上的重力()所做的功为

该做功是负的,因为向上位移和向下重力具有相反的方向.

还必须在系统上(在输入端)进行做功,以将进入的流体推入管中,并在系统上(在输出端)进行做功,以推动位于流出流体前方的流体.通常,作用在面积为的管中的流体样本上的大小为的力使流体移动距离所做的功是

这样,在系统上完成的功为,而系统完成的功为.他们的总和是

方程14-31的功-动能定理现在变为

代入公式14-32,14-33和14-34可得出

稍作重新排列后,这与我们着手证明的方程式14-28相匹配.