在本介绍性章节中，我们介绍了在流体流动分析中常用的基本概念。在本章中，我们首先讨论物质的各个阶段以及流体流动的多种分类方法，例如粘性流动与不粘稠流动区域，内部流动与外部流动，可压缩流动与不可压缩流动，层状流动与湍流，自然流动与强制流动,以及稳定流量与不稳定流量。我们还将讨论固-液界面处的无滑条件，并简要介绍流体力学发展的历史。在介绍了系统和控制体积的概念之后，我们回顾了将要使用的单位系统。然后，我们讨论如何准备针对工程问题的数学模型，以及如何解释从此类模型的分析中获得的结果。随后介绍了一种直观的系统性问题解决技术，该技术可以用作解决工程问题的模型。最后，我们讨论了工程测量和计算中的准确性，精度和有效数字。

* 1. **绪论** 2021年4月20日19点18分

**力学**是最古老的物理科学，它在力的作用下处理静止物体和运动物体.涉及静止物体的力学分支称为**静力学**,而涉及在力作用下运动的物体的力学分支称为**动力学**.子类别的**流体力学**定义为处理静止(流体静力学)或运动(流体动​​力学)流体行为以及边界处流体与固体或其他流体相互作用的科学.通过将静止流体视为零速度运动的特殊情况,流体力学也被称为流体动力学(图1-1).

流体力学本身也分为几类.可以近似地描述为不可压缩流体(例如液体,特别是水和低速气体)运动的研究通常称为**流体动力学[hydrodynamics]**.**水力学[hydraulics]**是流体力学的一个子类别,它处理管道和明渠中的液体流动.**气体动力学**处理密度发生显着变化的流体流,例如高速通过喷嘴的气体流.**空气动力学[aerodynamics]**类别涉及气体(尤其是空气)在飞机,火箭和汽车等物体上以高或低速流动时的气流.其他一些专业类别,例如**气象学**,**海洋学**和**水文学**,也涉及自然流.

**什么是流体?**

您会从物理学中回想起一种物质存在于三个主要阶段:固体,液体和气体.(在非常高的温度下,它也以等离子体形式存在.)处于液相或气相的物质称为**流体**.固体和流体之间的区别是基于该物质抵抗趋于改变其形状的施加的切应力(或切向应力)的能力.固体可以通过变形来抵抗施加的剪切应力,而**无论其大小如何,流体都会在剪切应力的影响下连续变形**.在固体中,应力与应变成正比,而在流体中,应力与应变率成正比.当施加恒定的剪切力时,固体最终以某个固定的应变角停止变形,而流体永不停止变形并接近恒定的应变率.

考虑将矩形橡胶块紧紧放置在两个板之间.如**图1-2**所示,固定下板的同时用力拉上板,橡胶块变形.变形角(称为剪切应变或角位移)与施加的力成正比.假设橡胶和板之间没有打滑,则橡胶上表面的位移量等于位移当下表面保持静止时,上板的角度保持不变.在平衡状态下,在水平方向上作用在上板上的净力必须为零,因此,与相等且相反的力必须作用在该板上.由于摩擦而在板-橡胶界面处产生的反作用力表示为,其中是剪切应力,是上板和橡胶之间的接触面积.解除力后,橡胶将返回其原始位置.如果施加的力不超过弹性范围,则在其他固体(例如钢块)中也会观察到此现象.如果使用液体重复进行此实验(例如,将两个大的平行板放置在一大块水中),则与上板接触的流体层将以板的速度连续移动,并与板一起移动,不论有多小.由于流体层之间的摩擦,流体速度会随着深度的增加而降低,在下部平板处达到零.

您会从静力学中回想起,**应力[stress]**定义为每单位面积的力,并且通过将力除以其作用的面积来确定.作用在单位面积上的力的法向分量称为**法向应力**,作用在单位面积上的力的切线分量称为**剪切应力[shear stress]**(**图1-3**).在静止的流体中,法向应力称为**压强[pressure]**.静止的流体处于零切应力状态.当容器壁被移除或倾斜液体容器时,随着液体的移动会产生剪切力,以重新建立水平的自由表面.

在液体中,分子组可以相对移动,但是由于分子之间的强大内聚,其体积保持相对恒定.结果,液体呈其所处容器的形状,并且在重力场中其在较大的容器中形成自由表面.另一方面,气体会膨胀直到遇到容器壁并充满整个可用空间.这是因为气体分子间隔很宽,并且它们之间的内聚力非常小.与液体不同,敞开的容器中的气体不能形成自由表面(**图1-4**).

尽管在大多数情况下很容易区分固体和流体,但是在某些临界情况下这种区分还不是很清楚.例如,沥青会出现并表现为固体,因为它可以在短时间内抵抗剪切应力.但是,当长时间施加这些力时,沥青会以流体的形式缓慢变形.一些塑料,铅和浆料混合物表现出相似的行为.这种临界情况超出了本文的范围.我们在本文中处理的流体将被清晰地识别为流体.

分子间键在固体中最强而在气体中最弱.原因之一是固体中的分子紧密堆积在一起,而在气体中它们之间的距离相对较大(图1-5).固体中的分子以始终重复的模式排列.由于固体中分子之间的距离很小,因此分子彼此之间的吸引力很大,并且将分子保持在固定位置.液相中的分子间距与固相没有太大差异,不同之处在于分子之间不再处于相对固定的位置,并且分子可以自由旋转和平移.在液体中,分子间力相对于固体弱,但与气体相比仍然强.随着固体变成液体,分子之间的距离通常会略微增加,水是一个明显的例外.

在气相中,分子彼此分开,并且不存在分子有序.气体分子无规移动,不断相互碰撞,并与被限制在其中的容器壁碰撞.特别是在低密度下,分子间力非常小,并且碰撞是分子之间相互作用的唯一方式.气相中的分子的能量水平比液相或固相中的分子高得多.因此,气体在凝结或冻结之前必须释放大量能量.

气体和**蒸气[vapor]**经常被用作同义词.高于临界温度时,物质的气相通常称为气体.蒸气通常意味着当前相离凝结状态不远.

任何实际的流体系统都由大量分子组成,并且系统的性质自然取决于这些分子的行为.例如，容器中气体的压力是分子与容器壁之间的动量传递的结果.然而,不需要知道气体分子的行为来确定容器中的压力.在容器上连接压力表就足够了(图1-6).这种宏观或经典方法不需要了解单个分子的行为,并提供了一种直接而简便的方法来分析工程问题.相当复杂的微观或统计方法是基于大分子单个分子的平均行为,在本文中只是作为辅助角色使用.

**流体力学的应用领域**

重要的是要对流体力学的基本原理有一个很好的理解,因为流体力学广泛用于日常活动和从吸尘器到超音速飞机的现代工程系统的设计中.例如,流体力学在人体中起着至关重要的作用.心脏不断地通过动脉和静脉将血液泵送到人体的各个部位,而肺部则是沿交替方向流动的部位.所有人造心脏,呼吸机和透析系统均采用流体动力学设计(图1–7).

在某些方面,普通房屋是一个充满流体力学应用的展览厅.用于单个房屋和整个城市的水,天然气和污水的管道系统主要是根据流体力学设计的.加热和空调系统的管道和管道网络也是如此.冰箱包括制冷剂流经的管,对制冷剂加压的压缩机以及制冷剂吸收和排热的两个热交换器.流体力学在所有这些组件的设计中起着重要作用.甚至普通水龙头的操作都是基于流体力学的.

我们还可以看到流体力学在汽车中的众多应用.所有与燃油从燃油箱到气缸的运输相关的组件-燃油管线,燃油泵,燃油喷射器或化油器-以及气缸中燃油和空气的混合以及燃烧气体的净化在排气管中使用流体力学进行分析.流体力学还用于加热和空调系统,液压制动器,动力转向,自动变速器.润滑系统,包括散热器和水泵在内的发动机缸体的冷却系统的设计中,甚至轮胎.新型模型车的光滑流线型形状是通过对表面流动进行广泛分析而努力将阻力最小化的结果.

在更广泛的规模上,流体力学在飞机,轮船,潜艇,火箭,喷气发动机,风力涡轮机,生物医学设备,电子元件冷却系统以及移动水,原油,和天然气.在建筑物,桥梁甚至广告牌的设计中也要考虑到这一点,以确保结构可以承受风荷载.大量的自然现象,例如降雨周期,天气模式,地下水上升到树木顶部,风,海浪以及大型水体中的水流,也受流体力学原理的支配(图1-8).

**1.3 无滑条件** 2021年4月23日15点39分

流体流动通常受固体表面限制,了解固体表面的存在如何影响流体流动非常重要.我们知道,河流中的水不能流过大石头,而必须绕过大石头.也就是说,垂直于岩石表面的水速必须为零,并且接近表面的水通常会在表面完全停止.还不是很明显的是,以任何角度接近岩石的水也会在岩石表面完全停止,因此表面的水切线速度也为零.

考虑流体在固定管中或在无孔(即流体不可渗透)的固体表面上的流动.所有实验观察结果都表明,运动中的流体在表面完全停止流动,并且相对于表面的速度为零.也就是说,与固体直接接触的流体“粘”在了表面上,并且没有打滑.这被称为**无滑[no-slip]条件**.引起粘滑状态和边界层发展的流体性质是粘度,将在第2章中进行讨论.

图1-14中的照片清楚地显示了由于流体粘附到钝鼻表面而导致的速度梯度的演变.粘在表面上的层会由于相邻的流体层之间的粘性力而使相邻的流体层变慢,从而使下一层变慢,依此类推.无滑动条件的结果是,在流体与固体表面之间的接触点处,所有速度曲线都必须相对于表面具有零值(图1-15).因此,无滑移条件负责速度分布的发展.与壁相邻的,粘性效应(因而速度梯度)显着的流动区域称为**边界层**.无滑条件的另一个后果是表面阻力或皮肤摩擦阻力,这是流体沿流动方向施加在表面上的力.

当流体被迫流过弯曲的表面(例如圆柱体的背面)时,边界层可能不再保持附着在表面上并与表面分离,这一过程称为**流动分离**(图1-16).我们强调,无滑条件适用于整个表面,甚至在分离点的下游.在第9章中将更详细地讨论流分离.

在传热中会发生类似于无滑状态的现象.当两个处于不同温度的物体接触时,会发生热传递,从而使两个物体在接触点处呈现相同的温度.因此,流体和固体表面在接触点处具有相同的温度.这称为无温度跳跃条件.

**1.4 流体流动的分类** 2021年4月23日15点43分——2021年5月11日18点18分

早先,我们将流体力学定义为处理静止或运动中的流体行为以及边界处的流体与固体或其他流体的相互作用的科学.在实践中遇到了各种各样的流体流动问题,通常方便的是根据一些共同的特征对它们进行分类,从而使对它们的分组研究成为可能.有多种方法可以对流体流动问题进行分类,这里我们介绍一些常规类别.

**粘性与非粘性流动区域**

当两个流体层相对移动时,在它们之间会产生摩擦力,而较慢的层则试图使较快的层变慢.该内部流动阻力通过流体特性粘度来量化,流体特性粘度是流体内部粘性的量度.粘度是由液体中的分子之间的内聚力和气体中的分子碰撞引起的.没有粘度为零的流体,因此所有流体流动都在某种程度上涉及粘性作用.摩擦作用显着的流动称为**粘性流动**.但是,在许多具有实际意义的流程中,有些区域(通常是不靠近实体表面的区域)的粘性力比惯性力或压力小.在这种**不粘稠的流动区域**中忽略粘性项可以极大地简化分析,而不会造成很大的准确性损失.

将平板平行插入均匀速度的流体流中而形成的粘性和非粘性流动区域的发展如图1-17所示.由于无滑移条件,流体在两侧都粘在板上,并且在板表面附近粘性作用显着的薄边界层是粘性流动区域.在远离板的两侧并且在很大程度上不受板的存在影响的流动区域是不粘流动区域.

**内部流与外部流**

根据流体是在狭窄空间中还是在表面上流动,将流体流分为内部流还是外部流.无边界流体在诸如板,线或管之类的表面上的流动是外部流动.如果流体受固体表面限制,则管道或管道中的流为内部流.例如,管道中的水流是内部流,大风天在球体或裸露的管道上的气流是外部流(图1-18).如果管中的液体仅部分充满液体并且有自由表面,则该液体在导管中的流动称为明渠流动.河流和灌溉沟渠中的水流就是这种水流的例子.内部流主要受整个流场中粘度的影响.在外部流动中,粘性作用仅限于固体表面附近的边界层,并且仅限于唤醒物体下游的区域.

**可压缩流与不可压缩流**

根据流动过程中密度变化的程度,将流动分类为可压缩或不可压缩.不可压缩性是一种近似值,如果密度在整个过程中几乎保持恒定,则流体称**不可压缩**.因此,当流体近似不可压缩时,流体各部分的体积在其运动过程中保持不变.

液体的密度基本上是恒定的,因此液体的流动通常是不可压缩的.因此,液体通常被称为不可压缩物质.例如,210 atm的压力会使1 atm的液态水的密度仅发生1％的变化.另一方面,气体是高度可压缩的.例如,仅0.01个大气压的压力变化会导致大气密度变化1％.

在分析涉及高速气流的火箭,航天器和其他系统时(图1-19),流速通常用无量纲**马赫数**表示:

其中是在室温和海平面上空气中的声速值的.当时,将流称为**声速[sonic]**;当时,将称为**亚音速[subsonic]**;当时,将称为**超音速[supersonic]**;当时，将称为**高超音速[hypersonic]**.第7章将详细讨论无量纲参数.第12章将详细讨论可压缩流.

液体流是不可压缩的,但精度很高,但是,当将气体流建模为不可压缩时,气体流的密度变化水平以及随之而来的近似水平取决于马赫数.如果密度变化在5％以下,则通常可以将气流近似为不可压缩的,这通常在的情况下发生.因此,在低于约的速度下,可以忽略室温下空气的可压缩性.但是,对于超声速流动,可压缩性效应绝对不能忽略,因为会发生像冲击波这样的可压缩流动现象(图1-19).

与大的压力变化相对应的液体的小密度变化仍然会产生重要的后果.例如,水管中的刺激性“水锤”是由阀门突然关闭后压力波反射所产生的水管振动引起的.

**层流与湍流**

有些流程是平稳有序的,而另一些则比较混乱.以光滑的流体层为特征的高度有序的流体运动称为**层流[laminar]**.层流一词来自相邻流体粒子在“层流”中的运动.低流速的高粘度流体(例如油)的流动通常是层流的.通常在高速下发生并以速度波动为特征的高度无序的流体运动称为**湍流[turbulent]**(图1-20).低粘度流体(例如空气)在高速下的流动通常是湍流的.在层流和湍流之间交替流动的流动称为**过渡流动[transitional]**.奥斯本·雷诺(Osborne Reynolds)在1880年代进行的实验建立了无量纲的**雷诺数Re**，作为确定管道中流动状态的关键参数(第8章).

**自然(或非强制)流与强制流**

根据流体运动的启动方式,流体流动是自然的或被强迫的.在强制流动中,流体被诸如泵或风扇的外部装置强迫在表面上或在管道中流动.在自然流动中,流体运动是由于诸如浮力效应之类的自然手段引起的,浮力效应表现为温度升高(因而温度较低的流体)的上升和温度较低(因此密度较高的流体)的下降(图1-21).例如,在太阳能热水系统中,通常通过将水箱充分放置在太阳能收集器上方来使用热虹吸效应来代替水泵.

**稳定与不稳定流动**

术语“稳定”和“一致”在工程中经常使用,因此重要的是要清楚地理解其含义.术语“**稳定**”表示在某个时间点上特性,速度,温度等没有变化.稳定的反面是**不稳定**,术语“**一致**”表示在指定区域内的位置不会发生变化.这些含义与其日常使用(稳定的女友,一致的分配等)是对等的.

术语“不稳定”和“瞬态”通常可以互换使用,但是这些术语不是同义词.在流体力学中,不稳定是最通用的术语,适用于任何不稳定的流动,但是**瞬态[transient]**通常用于发展流动.例如，当火箭发动机启动时,会产生短暂的影响(火箭发动机内部压力增大,气流加速等),直到发动机稳定下来并稳定运行为止.术语“**周期性**”是指非稳定流的一种,其中该流围绕稳定均值振荡.

涡轮机,压缩机,锅炉,冷凝器和热交换器等许多设备在相同条件下可长时间运行,因此被归类为稳定流设备.(请注意,涡轮机旋转叶片附近的流场固然不稳定,但是在对设备进行分类时,我们考虑的是整体流场,而不是某些位置的细节.)在稳定流期间,流体特性可能会从点变化到另一点.设备中的最大点,但在任何固定点它们都保持不变.因此,在稳定运行中,稳定流动装置或流动部分的体积,质量和总能量含量保持恒定.图1-22显示了一个简单的类比.

恒定流量条件可以通过旨在连续运行的设备(例如涡轮机,泵,锅炉,冷凝器和发电厂或制冷系统的热交换器)来近似估算.一些循环装置,例如往复式发动机或压缩机,不能满足稳定流动条件,因为入口和出口处的流动是脉动的并且不稳定.但是,流体特性会随时间周期性变化,并且通过使用这些特性的时间平均值,仍可以将通过这些设备的流量作为稳定流量过程进行分析.

Milton Van Dyke(1982)在《流体运动专辑》一书中提供了一些有趣的流体流动可视化.图1–23很好地说明了非恒定流场,该图取自Van Dyke的书。图1-23a是高速电影的瞬时快照.它揭示了巨大的,交替的,漩涡状的涡流,这些涡流从物体的钝基处掉入周期性振荡的尾流中.不稳定的尾流会产生波浪,这些波浪会以不稳定的方式在机翼的顶部和底部表面上交替向上游移动.图1–23b显示了相同的流场,但是胶卷被曝光了更长的时间,因此图像在12个周期内被时间平均.最终的时间平均流场显得“稳定”,因为在长时间曝光后,不稳定振动的细节已经消失了.

工程师最重要的工作之一是确定仅研究时间平均的问题“稳定”流动特征是否足够,还是需要对不稳定的特征进行更详细的研究.如果工程师只对流场的整体属性(例如时间平均阻力系数,平均速度和压力场)感兴趣,则可以使用图1–23b的时间平均描述,时间平均的实验测量值,或对时间平均流场进行分析或数值计算就足够了.但是,如果工程师对不稳定流场的细节感兴趣,例如流动引起的振动,不稳定压力波动或湍流涡流或冲击波发出的声波,则可以对流场进行时间平均描述是不够的.

本教科书中提供的大多数分析和计算示例均处理稳态或时间平均流量,尽管我们有时也会在适当时指出一些相关的非稳态流量特征.

**一维,二维和三维流**

流场最好通过其速度分布来表征,因此,如果流速分别沿一,二或三个主要维度变化,则流被称为一维,二维或三维.典型的流体流涉及三维几何形状,并且速度在所有三个维度上都可能变化,从而使流的三维.但是,某些方向上的速度变化相对于其他方向上的变化可能很小,并且可以忽略不计,而误差可以忽略不计.在这种情况下,可以方便地将流建模为一维或二维,这更易于分析.

考虑从大水箱进入圆形管道的流体的稳定流动.由于无滑移条件,管道表面各处的流体速度均为零,并且由于速度沿方向和方向都发生了变化,因此在管道的入口区域中的流动是二维的,而在方向上却没有发生变化.速度分布图完全发展,并且在距入口一定距离后仍保持不变(湍流中大约为10个管径,通常比层流中的直径大,如图1-24所示),并且据说该区域的流速为得到充分发展.如图1-24所示,圆管中完全展开的流是一维的,因为速度在径向r方向上变化,但在角度或轴向方向上没有变化.即,速度分布在任何轴向z位置都相同,并且关于管道的轴对称.

请注意,流的维数还取决于坐标系及其方向的选择.例如,讨论的管道流量在圆柱坐标系中是一维的,而在笛卡尔坐标系中是二维的—说明了选择最合适的坐标系的重要性.还要注意,即使在这种简单的流动中,由于无滑移的情况,整个管道的横截面的速度也无法保持一致.但是,在管道的圆形入口处,速度分布可以近似为在整个管道上几乎均匀,因为除了在非常接近管道壁的情况下,在所有半径上速度几乎都是恒定的.当长宽比大且流量沿较长的方向没有明显变化时,

流量可以近似为二维.例如,由于天线的长度远大于天线的直径,并且在天线上流动的气流相当均匀(图1–25),因此可以认为它在天线的两端除外,而是二维的.

**均匀流与非均匀流**

均匀流动意味着所有流体特性(例如速度,压力,温度等)都不会随位置而变化.例如,将风洞测试部分设计为使气流尽可能均匀.但是,即使那样,由于如前所述,由于无滑移条件和边界层的存在,当我们接近风洞壁时,气流仍不能保持均匀.恰好圆整的管道入口(图1-24)下游的流量几乎均匀,除了壁附近的边界层非常薄之外.在工程实践中,为了简化计算,通常将均匀分布在导管和管道中以及入口和出口处的流量近似化,即使不是均匀的情况也是如此.例如,图1-24的完全展开的管道流速分布图当然不是均匀的,但是出于计算目的,我们有时将其近似为在管道最左侧具有相同平均速度的均匀分布图.尽管这使计算更容易,但是它也引入了一些需要校正因子的错误.这些分别在第5章和第6章中讨论了动能和动量.

**1-5 系统和控制体积** 2021年4月23日16点03分——2021年5月13日17点10分

**系统**被定义为研究中所选择的物质的数量或空间中的区域.系统外部的质量或区域称为**环境[surroundings]**.将系统与周围环境分隔开的真实或虚构表面称为**边界**(图1–27).系统的边界可以是固定的或可移动的.请注意,边界是系统和周围环境共享的接触面.从数学上讲,边界的厚度为零,因此它既不能包含任何质量,也不能占据任何空间.系统是被视为封闭的还是开放的,取决于是否选择固定的质量或空间体积进行研究.

封闭系统(也称为控制质量,或在上下文明确时也称为控制系统)由固定量的质量组成,没有质量可以越过边界.但是,以热或功的形式出现的能量可以越过边界,并且封闭系统的体积不必固定.如果在特殊情况下,甚至不允许能量越过边界,则该系统称为**孤立系统**.

考虑图1–28中所示的活塞缸设备.让我们说,我们想找出封闭的气体在加热时会发生什么.由于我们将注意力集中在气体上,因此这是我们的系统.活塞和气缸的内表面形成边界,并且由于没有质量越过该边界,因此它是一个封闭的系统.请注意,能量可能会越过边界,并且边界的一部分(在这种情况下为活塞的内表面)可能会移动.气体之外的所有物体,包括活塞和气缸,都是周围的环境.

**开放系统**或**控制体积**是空间中的选定区域.它通常封闭一个涉及质量流的设备,例如压缩机,涡轮机或喷嘴.通过选择设备内的区域作为控制体积,可以最好地研究通过这些设备的流量.质量和能量都可以越过控制体积的边界(控制表面).

大量工程问题涉及到开放系统的质量流量,因此被建模为控制体积.热水器,汽车散热器,涡轮机和压缩机都涉及质量流,应将其作为控制体积(开放系统)而不是控制质量(封闭系统)进行分析.通常,可以选择空间中的任意区域作为控制体积.选择控制体积没有具体规则,但是明智的选择无疑会使分析更加容易.例如,如果要分析通过喷嘴的气流,则控制体积的一个不错的选择就是喷嘴内的区域,或者可能是整个喷嘴周围的区域.

如图1–29所示,控制体积可以固定大小和形状,例如使用喷嘴,也可以包含移动边界.但是,大多数控制体积具有固定的边界,因此不涉及任何移动的边界.除了质量相互作用外,控制体积还可能像封闭系统一样涉及热和功的相互作用.

**1-6 维数和单位的重要性** 2021年4月23日16点06分——2021年5月13日17点32分

任何物理量都可以用**量纲[dimensions]**来表征.分配给量纲的大小称为**单位**.选择一些基本量纲(例如质量m,长度L,时间t和温度T)作为**主要量纲**或**基本量纲**,而其他一些诸如速度V,能量E和体积V等表示为基本量纲,称为**次要量纲**或**派生量纲**.

这些年来,已经开发了许多单元系统.尽管科学和工程界为通过单一单位制统一世界做出了巨大努力,但今天仍普遍使用两套单位:英制,也称为美国习惯制(USCS);公制SI(来自LeSystèmeInternational d'Unités），也称为国际系统. SI是基于各个单元之间的十进制关系的简单而逻辑的系统,并且在包括英格兰在内的大多数工业化国家中,SI被用于科学和工程工作.但是,英语系统没有明显的系统数值基础,并且该系统中的各个单位之间的关系非常随意(12 in = 1 ft，1 mile = 5280 ft，4 qt = 1 gal等),使其变得混乱且难以学习.美国是唯一尚未完全转换为公制的工业化国家.

开发普遍接受的单位制的系统性努力可以追溯到1790年,当时法国国民议会责成法国科学院提出这种单位制.公制的早期版本很快在法国开发出来,但是直到1875年,包括美国在内的17个国家制定并签署了《公制公约》时,公制才被普遍接受.在该国际条约中,将米和克分别设置为长度和质量的公制单位,并成立了每六年召开一次的度量衡大会(CGPM).1960年,CGPM生产了基于六个基本数量的SI,并在1954年第十届度量衡大会上采用了它们的单位:长度为米(m),质量为千克(kg),第二为(kg) 是时间，安培（A）是电流，开氏度（°K）是温度，烛光（cd）是发光强度（光量）。 1971年，CGPM增加了第七个基本数量和单位：物质的摩尔数（mol）.

根据1967年引入的符号表示法,度数符号正式从绝对温度单位中删除,并且所有单位名称都应大写,即使它们是从专有名称衍生而来的(表1-1).但是,如果单位是从专有名称派生的,则该单位的缩写应大写.例如,以艾萨克·牛顿爵士(Isaac Newton)(1647–1723)命名的SI单位是牛顿(不是Newton),缩写为N.此外,单位的全名可以是复数形式,但其全称可以是复数形式。缩写不能。例如，物体的长度可以是5 m或5米，而不是5 ms或5米。最后，除非在句末出现，否则在单位缩写中不得使用句号。例如，meter的适当缩写是m（不是m。）。美国最近迈向公制系统的举动似乎始于1968年，当时国会响应世界其他地区的情况，通过了《公制研究法》。国会在1975年通过了《公制转换法》，继续促进自愿转换为公制。国会在1988年通过的贸易法案为所有联邦机构转换为公制设定了1992年9月的最后期限。但是，截止日期后来放宽了，没有针对未来的明确计划。如前所述，SI基于单位之间的十进制关系。表1-2中列出了用于表示各个单位的倍数的前缀。它们是所有单元的标准配置，并且由于它们的广泛使用，鼓励学生记住其中的一些（图1–30）。

某些国际单位制和英制单位

在SI中，质量，长度和时间的单位分别是千克（kg），米（m）和秒（s）。 英制中的相应单位是磅质量（lbm），英尺（ft）和秒（s）。 磅符号lb实际上是天秤座的缩写，天秤座是古罗马的重量单位。 即使在410年罗马帝国对英国的占领结束之后，英国人仍然保留了该符号。两个系统中的质量和长度单位通过以下方式相互关联：

在英语系统中，通常将武力视为主要方面之一，并为其指定非派生单位。 这是造成混乱和错误的根源，必须在许多公式中使用尺寸常数（gc）。 为避免这种麻烦，我们将力视为次要维度，其单位是根据牛顿第二定律得出的，即

在SI中，力的单位是牛顿（N），它定义为以1 m / s2的速度加速1 kg质量所需的力。 在英制中，力的单位是磅力（lbf），定义为以1 ft / s2的速度加速1个弹头（32.174 lbm）的质量所需的力（图1–31）。 那是，

1 N的力大约等于一个小苹果的重量（m = 102 g），而1 lbf的力大约等于四个中苹果的重量（mtotal = 454 g），如图1-32所示.在许多欧洲国家中，另一个常用的力单位是千克力（kgf），即海平面上1千克质量的重量（1 kgf = 9.807 N）。 重量一词通常被错误地用来表示质量，尤其是“重量观察者”。 与质量不同，重量W是一个力。 它是施加在人体上的重力，其大小是根据牛顿第二定律的公式确定的，

其中m是身体的质量，g是局部重力加速度（g在海平面和45度纬度下为9.807 m / s2或32.174 ft / s2）。 普通的浴室磅秤测量作用在身体上的重力。 物质每单位体积的重量称为比重γ，由γ=ρg确定，其中ρ为密度。

无论物体在宇宙中的位置如何，其质量都保持不变。然而，其重量随重力加速度的变化而变化。由于g随高度降低（少量），因此在山顶上的体重会减轻。在月球表面，宇航员的体重约为她或他通常在地球上体重的六分之一（图1–33）。如图1–34所示，在海平面上，1千克的质量为9.807N。但是，质量为1 lbm的质量为1 lbf，这使人们误以为磅质量和磅力可以互换地用作磅（lb），这是英语系统中错误的主要来源。应当注意，作用在质量块上的重力是由于质量块之间的吸引力所致，因此它与质量块的大小成正比，而与质量块之间的距离的平方成反比。因此，某个位置的重力加速度g取决于纬度，与地球的距离，并且在较小程度上取决于月亮和太阳的位置。 g的值随位置的变化而变化，从海拔4500 m以下的9.8295 m / s2到海拔100,000 m的7.3218 m / s2。但是，在海拔高达30,000 m的情况下，g与9.807 m / s2的海平面值之间的变化小于1％。因此，出于大多数实际目的，可以假定重力加速度恒定为9.807 m / s2，通常四舍五入为9.81 m / s2。有趣的是，g的值随着距离海平面以下的距离而增加，在海平面以下约4500 m处达到最大值，然后开始减小。 （您认为g的值在地球的中心吗？）

质量和重量之间混淆的主要原因是质量通常是通过测量其施加的重力间接测量的。 该方法还假定由其他作用（例如空气浮力和流体运动）施加的力可以忽略不计。 这就像通过测量恒星的红移来测量到恒星的距离，或者通过测量大气压力来测量飞机的高度。 这两个都是间接测量。 正确的直接测量质量的方法是将其与已知质量进行比较。 但是，这很麻烦，并且通常用于校准和测量贵金属。 功是一种能量形式，可以简单地定义为力乘以距离。 因此，其单位为“牛顿米（N.m）”，称为焦耳（J）。 那是，

SI中更常见的能量单位是千焦耳（1 kJ = 103 J）。在英语系统中，能量单位是Btu（英国热量单位），它定义为将68 F下的1磅水的温度提高1 F所需的能量。在公制中，将14.5°C时的1克水的温度提高1°C所需的能量定义为1卡路里（cal），而1 cal = 4.1868J。千焦和Btu的量级几乎相同（1 Btu = 1.0551 kJ）。这是一种感受这些单位的好方法：如果点燃典型的火柴并使其燃烧掉，它会产生大约1 Btu（或1 kJ）的能量（图1–35）。能量时间速率的单位是每秒焦耳（J / s），称为瓦（W）。在工作的情况下，能量的时间比率称为功率。常用的功率单位是马力（hp），相当于745.7W。电能通常以千瓦时（kWh）的单位表示，相当于3600 kJ。额定功率为1 kW的电器连续运行一小时会消耗1 kWh的电能。在处理发电时，单位kW和kWh通常会混淆。请注意，kW或kJ / s是功率的单位，而kWh是能量的单位。因此，诸如“新的风力涡轮机每年将产生50千瓦的电力”之类的说法是毫无意义和错误的。正确的表述应类似于“额定功率为50 kW的新风力涡轮机每年将产生120,000 kWh的电力。”

维度相同

我们都知道您不能添加苹果和橙子。 但是我们设法做到了（当然是错误的）。 在工程中，所有方程都必须在尺寸上是齐次的。 也就是说，方程式中的每个项都必须具有相同的维数。 如果在分析的某个阶段，我们发现自己可以添加两个具有不同维数或单位的数量，则可以清楚地表明我们在较早阶段犯了一个错误。 因此，检查尺寸（或单位）可以用作发现错误的有价值的工具。

我们都从经验中知道，如果不认真使用单位来解决问题，他们就会给他们带来头痛。 但是，只要有一些注意和技巧，单位就可以发挥我们的优势。 它们可以用来检查公式。 有时，它们甚至可以用来导出公式，如以下示例中所述。

您应该牢记，尺寸上均质的公式绝对是错误的（图1–38），但是尺寸上均质的公式不一定是正确的。

单位转化率

正如所有非主要尺寸都可以通过适当组合的主要尺寸来形成一样，所有非主要尺寸（次要尺寸）都可以通过主要尺寸的组合来形成。 例如，力单位可以表示为

它们也可以更方便地表示为单位转化率，例如

单位换算比等于1，并且是无单位的，因此可以方便地将此类比（或其反比）插入任何计算中以正确换算单位（图1–39）。 鼓励您在转换单位时始终使用单位转换率，例如此处给出的单位转换率。 一些教科书将定义为gc = 32.174 lbm·ft / lbf·s2 = kg·m / N·s2 = 1的古引力常数gc插入方程式中，以强制单位匹配。 这种做法会导致不必要的混乱，因此本作者强烈建议不要这样做。 我们建议您改用统一转化率。

当您购买一盒早餐麦片时，印刷品上可能会写着“净重：一磅（454克）”。 （请参见图1–41。）从技术上讲，这意味着盒子内的谷物在地球上的重量为1.00 lbf，质量为453.6 g（0.4536 kg）。 根据牛顿第二定律，地球上谷物的实际重量为

1-7 工程中的模型 2021年4月23日16点53分

可以通过实验（测试和测量）或分析（通过分析或计算）来研究工程设备或过程。实验方法的优点是我们可以处理实际的物理系统，并在实验误差的范围内通过测量确定所需的数量。但是，这种方法昂贵，费时且通常不切实际。此外，我们正在研究的系统甚至可能不存在。例如，在实际建造建筑物之前，通常必须根据给定的规格确定建筑物的整个供暖和管道系统的尺寸。分析方法（包括数值方法）具有快速且廉价的优点，但是所获得的结果受分析中假设，近似和理想化的准确性的影响。在工程研究中，通常可以通过以下方法达成妥协，即通过分析将选择减少到很少的选择，然后通过实验验证发现。大多数科学问题的描述都涉及将一些关键变量的变化相互关联的方程式。通常，在变化的变量中选择的增量越小，说明就越笼统和准确。在变量无穷小或微分变化的极限情况下，我们获得微分方程，这些微分方程通过将变化率表示为导数，从而为物理原理和定律提供了精确的数学公式。因此，微分方程用于研究科学和工程学中的各种问题（图1–42）。但是，在实践中遇到的许多问题都可以解决，而不必求助于微分方程及其相关的复杂性。物理现象的研究涉及两个重要步骤。第一步，确定影响现象的所有变量，进行合理的假设和近似，并研究这些变量的相互依赖性。调用相关的物理定律和原理，并以数学方式解决问题。该方程本身很有启发性，因为它显示了某些变量对其他变量的依赖程度以及各种术语的相对重要性。第二步，使用适当的方法解决问题，并解释结果。

实际上，自然界中似乎随机发生的许多过程都受到某些可见或不那么可见的物理定律的支配。无论我们是否注意到它们，这些法律都在那里，对似乎是普通事件的事件始终如一且可预测地支配着它们。这些法律中的大多数已被科学家很好地定义和理解。这样就可以在事件实际发生之前就对其进行预测，或者通过数学方法研究事件的各个方面，而无需实际运行昂贵且耗时的实验。这就是分析的力量所在。通过使用合适且切合实际的数学模型，只需花费很少的精力，即可获得针对有意义的实际问题的非常准确的结果。此类模型的准备需要对所涉及的自然现象和相关定律有充分的了解，并且要有合理的判断力。一个不现实的模型显然会给出不准确的结果，因此是不可接受的。解决工程问题的分析师通常会发现自己可以在非常准确但复杂的模型与简单但不太准确的模型之间进行选择。正确的选择取决于当前的情况。正确的选择通常是产生满意结果的最简单模型（图1–43）。同样，在选择设备时考虑实际的工作条件也很重要。准备非常准确但复杂的模型通常并不那么困难。但是，如果这些模型很难解决且耗时，则对分析人员而言并没有太大用处。该模型至少应反映它所代表的物理问题的基本特征。有许多重要的现实问题可以通过简单的模型进行分析。但是，应始终牢记，从分析中获得的结果充其量与简化问题时所作的假设一样准确。因此，获得的解决方案不应应用于原始假设不成立的情况。与观察到的问题性质不太一致的解决方案表明，所使用的数学模型过于粗糙。在这种情况下，应通过消除一个或多个可疑假设来准备更现实的模型。这将导致更复杂的问题，当然，这将更难解决。因此，对问题的任何解决方案都应在其表述的范围内进行解释。

1-8 解决问题的技术 2021年4月23日17点11分

学习任何科学的第一步是掌握基础知识并全面了解科学知识。 下一步是通过测试这些知识来掌握基础知识。 这是通过解决重大的现实问题来完成的。 解决这样的问题，特别是复杂的问题，需要系统的方法。 通过使用分步方法，工程师可以将复杂问题的解决方案简化为一系列简单问题的解决方案（图1–44）。 解决问题时，建议您酌情使用以下步骤。 这将帮助您避免一些与解决问题相关的常见陷阱。

步骤1：问题陈述

用您自己的话，简要说明问题，给出的关键信息以及要找到的数量。 这是为了确保您在尝试解决问题之前了解问题和目标。

步骤2：原理图

画出所涉及物理系统的逼真的草图，并在图中列出相关信息。 草图不必太复杂，但应类似于实际系统并显示关键特征。 指出与周围环境的任何能量和质量相互作用。 在草图上列出给定的信息可以帮助您一次查看整个问题。 另外，检查在过程中保持不变的属性（例如，等温过程中的温度），并在草图上指出它们。

步骤3：假设和近似

陈述为简化问题而做出的任何适当假设和近似值，以便有可能获得解决方案。 提出可疑的假设。 假设缺少必要数量的合理值。 例如，在没有大气压的具体数据的情况下，可以认为是1个大气压。 但是，在分析中应注意，气压随着海拔的升高而降低。 例如，它在丹佛（海拔1610 m）下降到0.83 atm（图1–45）。

步骤4：物理定律

应用所有相关的基本物理定律和原理（例如质量守恒），并利用所做的假设将其简化为最简单的形式。 但是，必须首先明确确定适用自然法则的区域。 例如，通过在喷嘴的入口和出口之间施加质量守恒来分析流过喷嘴的水的速度的增加。

步骤5：属性

从属性关系或表中确定解决问题所需的已知状态下的未知属性。 分别列出属性，并指出其来源（如果适用）。

步骤6：计算

将已知量替换为简化关系，然后执行计算以确定未知量。 要特别注意单位和单位取消，并记住没有单位的尺寸数量是没有意义的。 另外，不要通过复制计算器屏幕上的所有数字来误导高精度，而是将最终结果四舍五入为适当数量的有效数字（第1-10节）。

步骤7：推理，验证和讨论

检查以确保获得的结果合理且直观，并验证可疑假设的有效性。重复计算，得出不合理的值。例如，在相同的测试条件下，简化汽车的外形后，作用在汽车上的空气阻力不应增加（图1–46）。另外，指出结果的重要性，并讨论其含义。陈述可以从结果中得出的结论，以及可以从中得出的任何建议。强调适用结果的局限性，并注意避免任何可能的误解，并在不适用基本假设的情况下使用结果。例如，如果您确定在提议的管道中使用大直径管道将额外花费5000美元的材料费用，但它将使每年的抽水成本减少3000美元，则表明大直径管道将支付其与电的成本差异节省不到两年的时间。但是，还应指出，在分析中仅考虑了与较大直径管道相关的额外材料成本。请记住，您提供给讲师的解决方案以及提供给其他人的任何工程分析都是一种交流形式。因此，整洁，有条理，完整和视觉外观对于最大化有效性至关重要（图1–47）。此外，整洁度还可以作为一种很好的检查工具，因为在整洁的工作中很容易发现错误和不一致之处。粗心和跳过步骤以节省时间通常会导致花费更多的时间和不必要的焦虑。此处描述的方法用于解决的示例问题中，而没有明确说明每个步骤，以及本文的解决方案手册中都使用了这种方法。对于某些问题，某些步骤可能不适用或不必要。例如，单独列出属性通常是不切实际的。但是，我们不能过分强调解决问题的逻辑和有序方法的重要性。解决问题时遇到的大多数困难并不是由于缺乏知识；而是因为缺乏知识。而是由于缺乏组织。强烈建议您按照以下步骤解决问题，直到您开发出最适合自己的方法为止。

1-9 工程软件包 2021年4月23日17点17分

您可能想知道为什么我们要对另一项工程科学的基础知识进行深入研究。毕竟，使用当今市场上现成的几种复杂软件包之一，可以解决我们在实践中可能遇到的几乎所有此类问题。这些软件包不仅可以提供所需的数值结果，而且还可以以彩色图形形式提供输出，以实现令人印象深刻的演示。如果不使用其中一些软件包，今天就无法进行工程实践是不可想象的。轻触按钮，我们可获得的巨大计算能力既是福也是祸。它无疑使工程师能够轻松快捷地解决问题，但同时也为滥用和错误信息打开了大门。在受过良好教育的人们的手中，这些软件包就像在训练有素的士兵手中一样复杂的强大武器一样危险。认为可以使用工程软件包而无需经过适当的基础培训的人可以练习工程，就像认为可以使用扳手的人可以担任汽车修理工一样。如果确实是工程专业的学生不需要他们正在修读的所有这些基础课程，因为实际上几乎所有事情都可以由计算机快速轻松地完成，那么雇主也将不再需要高薪的工程师，因为任何人都可以知道如何使用文字处理程序的人也可以学习如何使用这些软件包。但是，统计数据表明，尽管有这些功能强大的软件包可用，但对工程师的需求却在上升，而不是在下降。我们应该永远记住，当今可用的所有计算能力和工程软件包都只是工具，而工具只有在大师手中才有意义。拥有最好的文字处理程序并不能使一个人成为一个好的作家，但无疑可以使一个好的作家的工作更加轻松，并使作家的工作效率更高（图1-48）。手动计算器并没有消除教我们的孩子如何进行加减法的需要，复杂的医学软件包也无法代替医学院的培训。工程软件包都不能替代传统的工程教育。它们只会导致从数学到物理课程重点的转移。也就是说，将花费更多的时间在课堂上，更详细地讨论问题的物理方面，而将更少的时间用于解决过程的机制上。

当今可用的所有这些奇妙而强大的工具给当今的工程师带来了额外的负担。他们必须像他们的前辈一样，对基本原理有透彻的了解，对物理现象有一种“感觉”，能够将数据放到正确的角度，并做出合理的工程判断。但是，由于当今可用的强大工具，他们必须使用更逼真的模型来更好，更快地完成它。过去，工程师不得不依靠手工计算，计算尺以及后来的手工计算器和计算机。今天，他们依靠软件包。容易获得这种功能以及简单的误解或误解可能造成巨大损害的可能性使得今天对工程基础知识进行扎实的培训比以往任何时候都更为重要。在本文中，我们付出了额外的努力，重点放在发展对自然现象的直观和物理理解上，而不是在求解过程的数学细节上。

方程计算器

您可能熟悉Microsoft Excel等电子表格的方程式求解功能。尽管简单，但Excel通常用于解决工程以及金融中的方程组。它使用户能够进行参数研究，绘制结果以及询问“如果...怎样”的问题。如果设置正确，它也可以求解联立方程。工程实践中也有许多复杂的方程式求解器，例如工程方程式求解器（EES），它是一个可以轻松地数值求解线性或非线性代数或微分方程组的程序。它具有一个内置的热力学特性函数和数学函数的大型库，并允许用户提供其他特性数据。与某些软件包不同，方程式求解器不能解决工程问题。他们只解决用户提供的方程式。因此，用户必须理解问题并通过应用任何相关的物理定律和关系来表述。方程式求解器通过简单地求解所得的数学方程式，为用户节省了大量时间和精力。这样就可以尝试解决不适合手工计算的重大工程问题，并可以快速，方便地进行参数研究。

CFD软件

计算流体动力学（CFD）在工程和研究中得到广泛使用，我们将在第15章中详细讨论CFD。由于CFD图形非常适合说明流线，速度和压力分布，因此在整本教科书中还展示了CFD的示例解决方案， 等等，超出了我们在实验室中可以看到的范围（图1–51）。 但是，由于有几种不同的商业CFD软件包可供用户使用，并且学生对这些代码的访问高度依赖于部门许可，因此我们不提供与任何特定CFD软件包相关的章末CFD问题。 相反，我们在第15章中提供了一些通用的CFD问题，并且我们还维护了一个网站（请参阅www.mhhe.com/cengel上的链接），其中包含可以用许多不同的CFD程序解决的CFD问题。 我们鼓励学生解决其中的一些问题以熟悉CFD。

1-10 准确性，精确度和有效数字 2021年4月23日17点31分

在工程计算中，所提供的信息不多于一定数量的有效数字，通常是三位数。 因此，获得的结果可能无法精确到更高的数字。 报告结果中的有效位数更高会错误地暗示比现有精度更高的精度，应避免这种情况。 无论采用哪种单位制，工程师都必须了解指导数字正确使用的三个原则：准确性，精度和有效数字。 对于工程测量，它们定义如下：

准确度误差（不准确度）是一个读数的值减去真实值。 通常，一组测量的准确性是指平均读数接近真实值的程度。 准确性通常与可重复的固定错误相关。

精度误差是一个读数的值减去读数的平均值。 通常，一组测量的精度是指分辨率的精细度和仪器的可重复性。 精度通常与不可重复的随机误差有关。

有效数字是相关且有意义的数字。

测量或计算可以非常精确，而不必非常精确，反之亦然。 例如，假设风速的真实值为25.00 m / s。 两个风速计A和B分别获取五个风速读数：

风速仪A：25.50、25.69、25.52、25.58和25.61 m / s。 所有读数的平均值= 25.58 m / s。

风速仪B：26.3、24.5、23.9、26.8和23.6 m / s。 所有读数的平均值= 25.02 m / s。

显然，风速计A更为精确，因为没有一个读数与平均值的差异超过0.11 m / s。但是，平均速度为25.58 m / s，比真实风速大0.58 m / s。这表示明显的偏差误差，也称为恒定误差或系统误差。另一方面，风速仪B并不是很精确，因为它的读数与平均值有很大的偏差。但其总体平均值更接近真实值。因此，至少对于这组读数而言，风速仪B比风速仪A更准确，即使它的精度较差。可以通过类似于在目标上射击箭头来有效地说明准确性和精度之间的差异，如图1–52所示。射击者A非常精确，但不是非常准确，而射击者B具有更好的整体准确性，但准确性较低。许多工程师在计算中没有适当注意有效数字的数量。数字中的最低有效数字表示测量或计算的精度。例如，写为1.23（三位有效数字）的结果表示结果精确到小数点后第二位一位。即该数字在1.22和1.24之间。用更多数字来表示此号码会产生误导。当有效数字以指数表示法书写时，最容易计算出有效数字的数量。然后可以简单地计算出有效位数，包括零。另外，最低有效数字也可以用下划线标出，以表明作者的意图。表1–3中显示了一些示例。当执行多个参数的计算或操作时，最终结果通常仅与问题中最不精确的参数一样精确。例如，假设将A和B相乘得到C。如果A = 2.3601（五个有效数字），而B = 0.34（两个有效数字），则C = 0.80（最终结果中只有两个数字有效）。请注意，大多数学生都倾向于用六个有效数字来写C = 0.802434，因为这是将这两个数字相乘后在计算器上显示的内容。

让我们仔细分析这个简单的例子。假设B的精确值为0.33501，仪器将其读取为0.34。此外，假设用更精确的仪器测得的A恰好是2.3601。在这种情况下，C = A×B = 0.79066至5个有效数字。请注意，我们的第一个答案C = 0.80在小数点后第二位是一位数字。同样，如果B为0.34499，并且仪器将其读取为0.34，则A和B的乘积将为0.81421至5个有效数字。我们原来的0.80的答案再次在小数点后第二位减少了一位数字。这里的要点是0.80（到两位有效数字）是该乘法可以期望的最好结果，因为从一开始，其中一个值只有两位有效数字。另一种看待这个问题的方式是说，答案中的前两位之外，其余的数字是没有意义的或不重要的。例如，如果报告了计算器显示的内容，则2.3601乘以0.34等于0.802434，则最后四位无意义。如图所示，最终结果可能在0.79到0.81之间-超出两个有效数字的任何数字不仅无意义，而且具有误导性，因为它们向读者暗示比实际值更高的精度。再举一个例子，考虑一个装有汽油的3.75升容器，其密度为0.845千克/升，并确定其质量。您可能首先想到的是将体积和密度相乘以获得质量3.16875千克，这错误地暗示了如此确定的质量精确到六个有效数字。但是，实际上，质量不能比三个有效数字更精确，因为体积和密度都只能精确到三个有效数字。因此，结果应四舍五入为三个有效数字，并且质量应报告为3.17千克，而不是计算器显示的重量（图1–53）。仅当体积和密度分别为3.75000 L和0.845000 kg / L时，结果3.16875 kg才是正确的。值3.75 L表示我们相当有把握地将体积精确度控制在±0.01 L之内，并且不能为3.74或3.76L。但是，体积可以为3.746、3.750、3.753等，因为它们都四舍五入为3.75 L.您还应该知道，有时我们会故意引入一些小错误，以避免麻烦的是寻找更准确的数据。例如，在处理液态水时，我们经常使用1000 kg / m3的密度值，该密度是纯水在0°C时的密度值。由于在此温度下的密度为975 kg / m3，因此在75°C下使用该值将导致2.5％的误差。水中的矿物质和杂质会带来额外的误差。在这种情况下，您应毫无保留地将最终结果四舍五入为合理数量的有效数字。此外，在工程分析结果中具有百分之几的不确定性通常是正常现象，而不是例外。

在计算中写入中间结果时，建议保留几个“额外”数字以避免舍入误差。但是，最终结果应考虑有效位数。您还必须牢记，结果中一定数量的有效位数不一定意味着整体精度的位数相同。例如，读数之一中的偏差误差可能会显着降低结果的整体准确性，甚至可能使最后一位有效数字变得毫无意义，并使可靠数字的总数减少一。实验确定的值易受测量误差的影响，这些误差会反映在获得的结果中。例如，如果物质的密度不确定度为2％，则使用此密度值确定的质量的不确定度也将为2％。最后，当有效位数未知时，公认的工程标准是三个有效位数。因此，如果给定的管道长度为40 m，我们将假定其为40.0 m，以便在最终结果中使用三位有效数字来证明其合理性。