本章讨论流体力学中常用的三个方程:质量方程,伯努利方程和能量方程.质量方程是质量守恒原理的表达式.伯努利方程与流体流的动能,势能和流动能的守恒以及它们在净粘性力可以忽略不计和其他限制条件适用的流动区域中相互转化.能量方程是能量守恒原理的陈述.在流体力学中,很方便将机械能与热能分开,将机械能由于摩擦作用而转化为热能的过程视为机械能损失.那么能量方程就变成了机械能平衡.本章首先概述守恒原理和质量关系守恒.然后讨论各种形式的机械能和机械工作装置(如泵和涡轮机)的效率.然后,我们通过将牛顿第二定律应用于沿流线的流体元素来推导出伯努利方程,并演示其在各种应用中的应用.我们继续以适用于流体力学的形式发展能量方程,并引入水头损失的概念.最后,我们将能量方程应用于各种工程系统.

5-1 介绍 2021年7月8日11点30分

您已经熟悉许多守恒定律,例如质量守恒定律,能量守恒定律和动量守恒定律.从历史上看,守恒定律首先应用于称为封闭系统或仅系统的固定数量的物质,然后扩展到称为控制体积的空间区域.守恒关系也称为平衡方程,因为任何守恒量必须在一个过程中平衡.我们现在简要描述质量和能量守恒关系,以及线性动量方程(图5-1).

质量守恒

发生变化的封闭系统的质量守恒关系表示为或,即系统的质量在一个过程中保持不变.对于控制体积(CV),质量平衡以速率形式表示为

其中和分别是流入和流出控制体积的质量流的总速率,并且是控制体积边界内的质量变化率.在流体力学中,为微分控制体积编写的质量守恒关系通常称为连续性方程.质量守恒在第5-2节中讨论.

线性动量方程

物体的质量与速度的乘积称为线性动量或简称为物体的动量,质量为的刚体以速度移动的动量是.牛顿第二定律指出,物体的加速度与作用在其上的合力成正比,与质量成反比,物体动量的变化率等于作用在物体上的合力.因此,只有当作用在系统上的合力为零时,系统的动量才保持恒定,因此该系统的动量守恒.这被称为动量守恒原理.在流体力学中,牛顿第二定律通常称为线性动量方程,在第6章与角动量方程一起讨论.

能量守恒

能量可以通过热或功传入或传出封闭系统,能量守恒原理要求在一个过程中传入或传出系统的净能量等于系统能量含量的变化.控制体积也涉及通过质量流的能量传递,能量守恒原理,也称为能量平衡,表示为

其中和分别为控制体积能量传入和传出的总速率,是控制体积边界内的能量变化率.在流体力学中,我们通常只考虑能量的机械形式.能量守恒在第5-6节中讨论.

**5-2 质量守恒** 2021年7月8日12点02分

质量守恒原理是自然界最基本的原理之一.这个原理大家都很熟悉,不难理解.一个人不必成为火箭科学家就可以计算出将100克油与25克醋混合可以得到多少醋油调味品.甚至化学方程式也是根据质量守恒原理来平衡的.当16kg氧气与2kg氢气反应时,会形成18kg的水(图5-2).在电解过程中,水分离回2千克氢和16千克氧.从技术上讲,质量并不完全守恒.事实证明,根据阿尔伯特·爱因斯坦(1879-1955)提出的著名公式,质量和能量可以相互转换:

其中是真空中的光速,即.这个方程表明质量和能量之间是等价的.所有物理和化学系统都表现出与其周围环境的能量相互作用,但与系统的总质量相比,所涉及的能量相当于极小的质量.例如,在正常大气条件下,由氧和氢形成1 kg液态水时,释放的能量为15.8 MJ,对应的质量仅为.然而,即使在核反应中,相互作用的能量的质量当量仅占所涉及的总质量的很小一部分.因此,在大多数工程分析中,我们将质量和能量都视为守恒量.

对于封闭系统,通过要求系统的质量在一个过程中保持恒定,隐含地使用了质量守恒原理.然而,对于控制体积,质量可以跨越边界,因此我们必须跟踪进入和离开控制体积的质量.

**质量和体积流量**

单位时间内流过横截面的质量量称为**质量流量[mass flow rate]**,用表示.符号上的点用于表示时间变化率.

流体通过管道或管道流入或流出控制体积.流经管道横截面中小面积单元的流体的差分质量流量与本身,流体密度𝜌和流速的分量正比于,我们将其表示为,并表示为(图5-3)

请注意,𝛿和都用于表示微分量,但𝛿通常用于作为路径函数且具有不精确微分的量(例如热量,功和质量传递),而用于表示(例如属性)是点函数并且有精确的微分的量.对于通过内半径为和外半径为的环空的流量,例如但是(通过环的总质量流量),而不是.对于指定的和值,的积分值是固定的(因此称为点函数和精确微分),但对于的积分情况并非如此.(因此命名路径函数和不精确差分).

通过管道或导管的整个横截面面积的质量流量通过积分获得:

虽然公式5-5始终有效(实际上它是精确的),但由于积分的原因,它并不总是适用于工程分析.我们想用管道横截面的平均值来表示质量流量.在一般的可压缩流中,𝜌和在整个管道中都不同.然而,在许多实际应用中,密度在管道横截面上基本上是均匀的,我们可以在方程5-5的积分之外取𝜌.然而,由于管壁处的无滑移条件,管道横截面上的速度永远不会均匀.相反,速度从壁处的零变化到管道中心线处或附近的某个最大值.我们将平均速度定义为整个管道横截面上的平均值(图5-4),

其中是垂直于流动方向的横截面面积.请注意,如果整个横截面的速度均为,则质量流量将与通过对实际速度分布图进行积分获得的流量相同.因此，对于不可压缩流，甚至对于可压缩流,其中𝜌近似为跨均匀,方程 5-5 变为

对于可压缩流,我们可以将视为横截面上的体积平均密度,然后方程5-7可以用作合理的近似值.为简单起见,我们去掉平均速度的下标.除非另有说明,表示流动方向上的平均速度.此外,表示垂直于流动方向的横截面积.

单位时间内流过横截面的流体体积称为**体积流量[volume flow rate]**(图 5-5)并由下式给出

方程5-8的早期形式由意大利僧侣Bene detto Castelli(大约1577-1644年)于1628年发表.请注意,许多流体力学教科书使用Q而不是为体积流量.我们用以免与传热混淆.

质量流量和体积流量的关系是,

其中是比容.

**质量守恒原理**

控制体积的**质量守恒原理**可以表示为:在时间区间期间传入或传出控制体积的净质量传递等于期间控制体积内总质量的净变化(增加或减少).也就是,

或

其中是过程中控制体积的质量变化(图5-6).它也可以用比率形式

其中和是进出控制体积的总质量流量,是控制体积边界内的质量变化率.方程5-10和5-11通常被称为**质量平衡**,适用于经历任何类型过程的任何控制体积.

考虑任意形状的控制体积,如图5-7所示.控制体积内微分体积的质量为.在任何时刻t的控制体积内的总质量由积分确定为,

那么控制体积内质量量的时间变化率表示为,

对于没有质量穿过控制面的特殊情况(即控制体积是一个封闭系统),质量守恒原理简化为.无论控制体积是固定的还是移动的,或变形,这个关系式都是有效的.

现在考虑通过固定控制体积控制面上的微分面积流入或流出控制体积的质量流量.设为法向于的外向单位矢量,为处相对于固定坐标系的流速,如图5-7所示.通常,速度可能以偏离法线的角度穿过,并且质量流量正比于速度的法向分量:范围从的最大流出流量为(流量垂直于)到的最小值为零(流与相切,再到最大流入(流动与垂直,但方向相反).利用两个向量的点积概念,速度法向分量的大小为,

通过的质量流量与流体密度𝜌,法向速度和流动面积成正比,表示为,

通过对整个控制面进出控制体积的净流量通过积分得到.在整个控制面上,

请注意对于𝜃 <90°(流出)为正,而对于𝜃> 90°(流入)为负.因此,自动考虑了流动方向,以及公式5-16中的表面积分直接给出净质量流量.的正值表示质量净流出,负值表示质量净流入.

将方程5-11重新排列为,固定控制体积的质量守恒则表示为,

**它指出控制体积内质量的时间变化率加上通过控制面的净质量流量等于零**.

控制体积的质量关系的一般守恒也可以使用雷诺输运定理(RTT)推导出来,将性质设为质量(第4章).然后我们有,因为质量除以质量以获得每单位质量的属性给出单位一.此外,封闭系统的质量是常数,因此其时间导数为零.即.那么雷诺输运方程立即简化为方程5-17,如图 5-8 所示,从而说明雷诺输运定理确实是一个非常强大的工具.

将方程5-17中的表面积分分成两部分——一部分用于流出流(正),另一部分用于流入流(负)——质量关系的一般守恒也可以表示为,

其中表示入口或出口的面积,求和符号用于强调所有入口和出口都将被考虑.使用质量流量的定义,公式5-18也可以表示为,

在解决问题时,控制体积的选择具有相当大的灵活性.许多控制体积选项可用,但有些更方便使用.控制体积不应引入任何不必要的麻烦.明智地选择控制体积可以使看似复杂的问题的解决变得相当容易.选择控制体积的一个简单规则是,只要有可能,就使控制面在与流体流动相交的所有位置垂直于流动.这样,点积就变成了速度的大小,积分变成了简单的𝜌VA(图5-9).

**移动或变形控制体积**

方程5-17和5-19也适用于移动控制体积,前提是绝对速度被相对速度代替,相对速度 是相对于控制面的流体速度(第4章).在移动但不变形的控制体积的情况下,相对速度是随着控制体积移动的人观察到的流体速度,表示为，其中是流体速度,是控制表面的速度,两者都相对于一个固定点之外.请注意,这是一个向量减法.

一些实际问题(例如通过柱塞的强制运动通过注射器针头注射药物)涉及变形控制体积.如果流体穿过控制面变形部分的速度是相对于控制面表示的(也就是说,流体速度应该相对于控制面表示),则开发的质量关系守恒仍可用于此类变形控制体积.参考系连接到控制面的变形部分).在这种情况下,控制面上任意点的相对速度再次表示为,其中是控制面在该点相对于控制体积外的固定点的局部速度.

**稳定流过程的质量平衡** 2021年7月8日16点48分

在稳定流动过程中,控制体积内包含的质量总量不随时间变化().那么质量守恒原理要求进入控制体积的质量总量等于离开它的质量总量.例如,对于稳定运行的花园软管喷嘴,单位时间内进入喷嘴的水量等于单位时间内离开喷嘴的水量.

在处理稳定流过程时,我们对随着时间流入或流出设备的质量不感兴趣;相反,我们对单位时间内流动的质量感兴趣,即质量流量.具有多个入口和出口的一般稳定流系统的质量守恒原理以速率形式表示为(图5-10),

它指出进入控制体积的总质量速率等于离开它的总质量速率.

许多工程设备,如喷嘴,扩散器,涡轮机,压缩机和泵都涉及单一流(只有一个入口和一个出口).对于这些情况,我们通常用下标1表示入口状态,用下标2表示出口状态,并去掉求和符号.然后,对于单流稳定流系统,公式 5-20 简化为

**特例:不可压缩流**

当流体不可压缩时,质量关系的守恒可以进一步简化,这通常是液体的情况.从一般稳定流关系的两边抵消密度,得到,

对于单流稳定流系统,方程5-22变为,

应该始终牢记,不存在“体积守恒”原则.因此,进出稳流装置的体积流量可能不同.尽管通过压缩机的空气质量流量是恒定的,但空气压缩机出口处的体积流量远小于入口处的体积流量(图5-11).这是由于压缩机出口处的空气密度较高.然而,对于稳定的液体流动,体积流量几乎保持不变,因为液体基本上是不可压缩的(密度恒定的)物质.通过花园软管喷嘴的水流是后一种情况的一个例子.

质量守恒原理要求在过程中考虑每一位质量.如果您可以平衡您的支票簿(通过跟踪存款和取款,或仅通过遵守“货币守恒”原则),则将质量守恒原理应用于工程系统应该没有困难.

**5-3 机械能和效率** 2021年7月9日10点10分

许多流体系统被设计成以指定的流速,速度和高度差将流体从一个位置输送到另一个位置,并且该系统可能在涡轮机中产生机械功,也可能在此过程中消耗泵或风扇中的机械功(图5-14).这些系统不涉及将核能,化学能或热能转化为机械能.此外,它们不涉及任何显着的传热,并且它们基本上在恒温下运行.通过仅考虑能量的机械形式和导致机械能损失(即转换为通常不能用于任何有用目的的热能)的摩擦效应,可以方便地分析此类系统.

**机械能**定义为能被理想机械装置如理想汽轮机完全直接转化为机械功的能量形式.动能和势能是机械能的常见形式.然而,热能不是机械能,因为它不能直接和完全地转化为功(热力学第二定律).

泵通过提高流体的压力将机械能传递给流体,而涡轮机通过降低流体的压力从流体中提取机械能.因此,流动流体的压力也与其机械能有关.实际上,压力单位Pa等于,即单位体积的能量,并且乘积或其等价形式具有单位,即每单位质量的能量.注意压力本身是不是一种能量形式;相反,它可以被认为是每单位体积存储的势能的量度.但是通过一定距离作用在流体上的压力会产生功,称为**流动功[flow work]**,单位质量为P/𝜌.流动功用流体特性表示,将其视为流动流体能量的一部分并称之为流动能是很方便的.因此,流动流体的机械能可以以单位质量为基础表示为,

其中是流动能,是动能,是流体的势能,都是单位质量的.那么流体在不可压缩流动过程中的机械能变化变为,

因此,如果流体的压力,密度,速度和高度保持恒定,则其机械能在流动过程中不会改变.在没有任何不可逆损失的情况下,机械能变化代表提供给流体(如果)或从流体中提取的机械功(如果).例如,涡轮机产生的最大(理想)功率为,如图5-15所示.

考虑一个装满水的高度为的容器,如图5-16所示,在底部表面选择参考水位.表压和每单位质量的势能在自由表面的A点处分别为和,在容器底部的B点处和.无论从容器的顶部还是底部接收水(或任何其他具有恒定密度的流体),处于底部的理想水轮机都会产生相同的单位质量功.请注意,我们假设通过从罐通向涡轮机的管道的理想流量(无不可逆损失)和涡轮机出口处的动能可以忽略不计.因此,底部水的总可用机械能等于顶部的总机械能.机械能的传递通常是通过旋转轴来完成的,因此机械功常被称为轴功.泵或风扇接收轴功(通常来自电动机)并将其作为机械能传递给流体(减少摩擦损失).另一方面,涡轮机将流体的机械能转换为轴功.由于摩擦等不可逆性,机械能不能完全从一种机械形式转换为另一种机械形式,设备或过程的机械效率定义为,

低于100%的转换效率表明转换并不完美,并且在转换过程中发生了一些损失.74%的机械效率表明26%的机械能输入由于摩擦加热而转化为热能(图5-17),这表现为流体温度的轻微升高.

在流体系统中,我们通常对增加流体的压力,速度和/或高度感兴趣.这是通过泵,风扇或压缩机(我们将它们统称为泵)向流体提供机械能来实现的.或者我们对涡轮机从流体中提取机械能并以旋转轴的形式产生机械能的逆过程感兴趣,该旋转轴可以驱动发电机或任何其他旋转设备.提供或提取的机械功与流体机械能之间转换过程的完善程度,用**泵效率**和**涡轮效率**来表示.在费率形式中,这些被定义为,

其中是流体机械能的增加率,相当于提供给泵的**有用泵送功率**流体,和

其中是流体减少的机械能,其等效于由涡轮机W.turbine从流体提取的所述机械功率的速率，e，并且我们使用绝对值符号来避免效率的负值。 100% 的泵或涡轮机效率表明轴功和流体机械能之间的完美转换，并且可以接近（但从未达到）该值，因为摩擦效应被最小化。机械效率不应与电动机效率和发电机效率相混淆，它们的定义为：

泵通常与其电机和涡轮机与其发电机一起打包。因此，我们通常对泵-电动机和涡轮-发电机组合的组合或整体效率感兴趣（图 5-18），其定义为：

刚刚定义的所有效率都在 0% 到 100% 之间。 0% 的下限对应于整个机械能或电能输入转化为热能，在这种情况下，该设备的功能类似于电阻加热器。 100% 的上限对应于没有摩擦或其他不可逆性的完美转换情况，因此机械能或电能没有转换为热能（没有损失）。

**5-4 伯努利方程** 2021年7月9日11点38分

**伯努利方程**是压力,速度和高度之间的近似关系,并且在净摩擦力可以忽略的稳定,不可压缩流动区域中有效(图5-22).尽管它很简单,但它已被证明是流体力学中非常强大的工具.在本节中,我们通过应用线性动量守恒原理推导出伯努利方程,并证明其有用性和局限性.

推导伯努利方程的关键近似是,与惯性,重力和压力效应相比,粘性效应小到可以忽略不计.由于所有流体都具有粘性(不存在“无粘性流体”这样的东西),因此这种近似不能适用于实际感兴趣的整个流场.换句话说,无论流体的粘度有多小,我们都不能在流动的任何地方应用伯努利方程.然而,事实证明,在许多实际流程的某些区域,这种近似是合理的.我们将这些区域称为流动的无粘性区域,我们强调它们不是流体本身无粘性或无摩擦的区域,而是净粘性或摩擦力与作用在其上的其他力相比可以忽略不计的区域流体粒子.

应用伯努利方程时必须小心,因为它是一种仅适用于无粘性流动区域的近似值.通常,摩擦效应在非常靠近实体壁(边界层)和直接位于物体下游(尾流)的地方总是很重要的.因此,伯努利近似通常适用于边界层和尾流之外的流动区域,其中流体运动受压力和重力的综合影响.

**流体粒子的加速**

粒子的运动及其所遵循的路径由作为时间和空间坐标以及粒子初始位置的函数的速度矢量描述.当流动稳定时(在特定位置不随时间变化),通过同一点的所有粒子都遵循相同的路径(即流线),并且速度矢量在每个点都与路径相切.

通常,根据粒子沿流线的距离以及沿流线的曲率半径来描述粒子的运动是很方便的.粒子的速度通过与距离相关,它可能沿着流线变化.在二维流中,加速度可以分解为两个分量:沿流线的流向加速度和沿流线法线方向的法向加速度,其公式为.请注意,流向加速度是由于沿流线的速度变化引起的,而法向加速度是由于方向的变化引起的.对于沿直线运动的粒子,,因为曲率半径无穷大,因此方向没有变化.伯努利方程源于沿流线的力平衡.

人们可能会认为在稳定流中加速度为零,因为加速度是速度随时间的变化率,而在稳定流中没有随时间的变化.嗯,一个花园软管喷嘴告诉我们这种理解是不正确的.即使在稳定的流量和恒定的质量流量下,水也会加速通过喷嘴(图5-23,如第4章所述).稳定只是意味着在指定位置不随时间变化,但数量的值可能会从一个位置变化到另一个位置.在喷嘴的情况下,水的速度在指定点保持恒定,但它从入口到出口发生变化(水沿喷嘴加速).

在数学上,这可以表示如下:我们将流体粒子的速度视为和的函数.取的总微分并将两边除以dt得到,

在稳定流中,因此,在方向的加速度变为,

其中如果我们跟随流体粒子沿着流线移动.因此,稳流中的加速度是由于速度随位置的变化而引起的.

**伯努利方程的推导**

考虑流体粒子在稳定流动的流场中的运动.在沿流线运动的粒子上在方向应用牛顿第二定律(在流体力学中称为线性动量方程),给出,

在净摩擦力可以忽略不计的流动区域,没有泵或涡轮机,也没有沿流线的热传递,作用在方向的重要力是压力(作用在两侧)和粒子在方向的权重(图5-24).因此,等式5-35变为,

其中𝜃是流线法线与该点垂直z轴之间的夹角,是质量,是流体粒子的重量,.代入,

从每个术语中消去并简化,

注意到并将每一项除以𝜌给出,

两边同时积分,

因为最后两项是精确微分.在不可压缩流的情况下,第一项也变成了一个精确的微分,积分给出,

这就是著名的**伯努利方程**(图5-25),它常用于流体力学中,用于在无粘性流动区域沿流线进行稳定,不可压缩的流动.伯努利方程最早是由瑞士数学家丹尼尔伯努利(1700-1782)在1738年在俄罗斯圣彼得堡工作时撰写的一篇文章中用文字表述的.后来由他的同事Leonhard Euler(1707-1783)在1755年以方程形式推导出来.

方程5-41中的常数值可以在流线上的任何点计算,其中压力,密度,速度和高程是已知.伯努利方程也可以写在同一流线上的任意两点之间,

我们认为是动能,是势能,是流能,都是单位质量.因此,伯努利方程可以看作是机械能平衡的表达,可以表述如下(图5-26):

当压缩性和摩擦效应可以忽略时,流体粒子的动能,势能和流动能的总和在稳定流动期间沿着流线是恒定的.

动能,势能和流动能是能量的机械形式,如第5-3节所述,伯努利方程可以看作是“机械能守恒原理”.对于不涉及机械能和热能相互转换的系统,这等效于一般能量守恒原理,因此机械能和热能是分开守恒的.伯努利方程指出,在摩擦可忽略不计的稳定,不可压缩流动期间,各种形式的机械能相互转换,但它们的总和保持不变.换句话说,在这种流动过程中没有机械能的耗散,因为没有将机械能转换为显热(内部)能的摩擦.

回想一下,当力通过一段距离施加到系统上时,能量以功的形式传递到系统.根据牛顿第二运动定律,伯努利方程也可以看成:压力和重力对流体粒子所做的功等于粒子动能的增加.

伯努利方程是从流体粒子沿流线运动的牛顿第二定律获得的.它也可以从应用于稳定流动系统的热力学第一定律获得,如第 5-6 节所示.

尽管在其推导中使用了高度限制性的近似值,但伯努利方程在实践中是常用的,因为可以使用它以合理的精度分析各种实际的流体流动问题.这是因为许多具有实际工程意义的流动是稳定的(或至少在平均值上是稳定的),可压缩性影响相对较小,并且在流动的某些感兴趣区域中的净摩擦力可以忽略不计.

**跨流线的力平衡**

留作练习以证明垂直于流线的方向上的力平衡产生以下适用于稳定不可压缩流的流线的关系:

其中是流线的局部曲率半径.对于沿弯曲流线的流动(图5-27a),压力朝着曲率中心减小,并且由于这种压力梯度,流体粒子会经历相应的向心力和向心加速度.

对于沿直线流动,和方程5-43简化为或,这是静止流体静压随垂直距离变化的表达式.因此,在无粘性流动区域中沿直线的稳定不可压缩流动中压力随高度的变化与静止流体中的压力相同(图5-27b).

**不稳定的可压缩流动**

类似地,使用加速度表达式(方程5-33)中的两个项,可以证明不稳定可压缩流的伯努利方程为,

**静态,动态和停滞压强** 2021年7月9日15点26分

伯努利方程表明流体粒子沿流线的流动,动能和势能的总和是常数.因此,流体的动能和势能在流动过程中可以转化为流动能(反之亦然),从而引起压力变化.通过将伯努利方程乘以密度,可以使这种现象更加明显,

这个方程中的每一项都有压力单位,因此每一项都代表某种压力:

* 是**静态压力**(它不包含任何动态效应);它代表流体的实际热力学压力.这与热力学和性质表中使用的压力相同.
* 是**动态压力**;它代表运动中的流体等熵停止时的压力上升.
* 是**静水压力**项,它不是真正意义上的压力,因为它的值取决于所选的参考水平;它考虑了海拔效应,即流体重量对压力的影响.(注意符号——与流体静压随流体深度增加不同,静水压力项随流体深度减小.)

静压,动压和静压之和称为**总压力**.因此,伯努利方程表明沿流线的总压力是恒定的.静压和动压之和称为**停滞压力[stagnation pressure]**,它表示为,

停滞压力表示流体以等熵方式完全停止的点处的压力.静态,动态和停滞压头如图5-28所示,其中压头是流体的等效柱高.当在指定位置测量静态和停滞压力时,该位置的流体速度计算公式为:

当使用静压分接头和皮托管的组合时,公式5-47可用于测量流速,如图5-28所示.**静压龙头**只是在墙上钻一个小孔,孔的平面与流动方向平行.它测量静压.**皮托管[Pitot tube]**是一种小管,其开口端与流体对齐,以便感应流动流体的全部冲击压力.它测量停滞压力.在流动液体的静压和滞压大于大气压的情况下,称为**压力计管[piezometer tube]**(或简称为压力计)的垂直透明管可以连接到压力水龙头和皮托管,如图所示在图5-28中.液体在压力计管中上升到与被测压力成正比的柱高(水头).如果要测量的压力低于大气压,或者如果测量气体压力,则压力计管不起作用.但是,静压龙头和皮托管仍然可以使用,但它们必须连接到其他类型的压力测量设备,例如U型管压力计或压力传感器(第3章).有时在皮托管上集成静压孔会很方便.结果是一个**皮托静压探头[Pitot-static probe]**(也称为皮托-达西探头),如图5-29所示,并在第8章中进行了更详细的讨论.

连接到压力传感器或压力计的皮托静压探头测量动态压力(从而推断流体速度)直接.当通过在管壁上钻孔来测量静压时,必须小心确保孔的开口与壁面齐平,孔前或孔后没有挤压物(图5-30).否则读数会包含一些动态效果,因此会出错.

当静止的物体浸入流动的水流中时,流体会在物体的前端(**停滞点[stagnation point]**)停止.从远上游延伸到滞点的流动流线称为**滞流线[stagnation streamline]**(图5-31).对于平面上的二维流动，滞点实际上是一条平行于z轴的线,滞流线实际上是一个将流过身体的流体与流动的流体隔开的面在身体下.在不可压缩的流动中,流体从其自由流速度几乎等熵地减速到驻点处的零,因此驻点处的压力就是驻点压力.

**伯努利方程的使用限制**

伯努利方程(方程5-41)是流体力学中最常使用和误用的方程之一.它的多功能性,简单性和易用性使其成为用于分析的非常有价值的工具,但相同的属性也使其很容易被误用.因此,了解其适用性的限制并观察其使用的限制非常重要,如此处所述:

**稳定流**. 伯努利方程的第一个限制是它适用于稳定流.因此,它不应在瞬态启动和关闭期间或流量条件变化期间使用.请注意,伯努利方程(方程5-44)有一种不稳定形式,对此的讨论超出了本文的范围(参见Panton,2005).

**粘性效应可忽略不计**. 每个流动都涉及一些摩擦,无论多么小,摩擦的影响可能会或可能不会忽略不计.由于可以容忍的错误量,情况变得更加复杂.通常,对于具有大横截面的短流动截面,尤其是在低流速下,摩擦效应可以忽略不计.摩擦效应通常在长而窄的流道,物体下游的尾流区域以及扩散器等发散流段中很显着,因为在这些几何形状中流体与壁分离的可能性增加.摩擦效应在固体表面附近也很显着,因此伯努利方程通常适用于流动核心区域的流线,但不适用于靠近表面的流线(图5-32).扰乱流动的流线型结构从而引起相当大的混合和回流的部件,例如管子的急剧入口或流动截面中的部分关闭的阀门,都可以使伯努利方程不适用.

**无轴功**. 伯努利方程源自沿流线运动的粒子的力平衡.因此,伯努利方程不适用于涉及泵,涡轮机,风扇或任何其他机器或叶轮的流动部分,因为这些设备会破坏流线并与流体粒子进行能量相互作用.当考虑的流动截面涉及这些设备中的任何一个时,应使用能量方程来代替轴功输入或输出.然而,伯努利方程仍然可以应用于机器之前或之后的流动截面(当然,假设满足对其使用的其他限制).在这种情况下,伯努利常数从设备的上游到下游发生变化.

**不可压缩流**. 伯努利方程推导中使用的近似之一是𝜌=常数,因此流动是不可压缩的.液体和马赫数小于约0.3的气体都满足这个条件,因为在这样相对低的速度下,压缩性效应和气体密度变化可以忽略不计.请注意,伯努利方程(方程5-40和5-44)存在可压缩形式.

**传热可忽略不计**. 气体的密度与温度成反比,因此伯努利方程不应用于涉及显着温度变化的流动部分,例如加热或冷却部分.

**沿流线流动**. 严格来说,伯努利方程 P/𝜌 + V2/2 + gz = C 适用于沿流线,而常数C的值一般对于不同的流线是不同的.然而,当流动的一个区域是无旋的并且流场中没有涡度时,常数C的值对于所有流线保持不变,伯努利方程也适用于所有流线(图5-33).因此,当流动为无旋时,我们不需要关心流线,我们可以在流动的无旋区域内的任意两点之间应用伯努利方程(第10章).

为简单起见,我们通过考虑平面中的二维流动来推导出伯努利方程,但该方程也适用于一般的三维流动,只要它沿同一流线应用即可.我们应该始终牢记推导伯努利方程时使用的近似值,并在应用之前确保它们是有效的.

**5-5 一般能量方程** 2021年7月12日2021年7月12日09点24分

自然界中最基本的定律之一是**热力学第一定律**,也称为**能量守恒定律**,它为研究各种形式的能量和能量相互作用之间的关系提供了良好的基础.它指出能量在一个过程中既不能被创造也不能被消灭;它只能改变形式.因此,在过程中必须考虑到每一点能量.

例如,一块从悬崖上掉下来的岩石,由于其势能转换为动能而加快了速度(图5-46).实验数据表明,当空气阻力可以忽略不计时,势能的减少等于动能的增加,从而证实了能量守恒原理.能量守恒原理也构成了饮食行业的支柱:能量输入(食物)大于能量输出(运动)的人会增加体重(以脂肪的形式储存能量)能量输入小于输出会减轻重量.系统能量含量的变化等于能量输入和能量输出之间的差值,任何系统的能量守恒原理都可以简单地表示为.

任何量(例如质量,动量和能量)的传递都在边界处被识别,因为该量越过边界.如果一个量从外到内越过边界,则称其进入系统(或控制体积),如果它沿相反方向移动,则称其离开系统.在系统内从一个位置移动到另一个位置的量在分析中不被视为转移量,因为它不会进入或退出系统.因此,在执行工程分析之前指定系统并因此清楚地确定其边界非常重要.

固定质量(封闭系统)的能量含量可以通过两种机制改变:传热Q和传递功W.那么固定质量的能量守恒可以用速率形式表示为(图5-47)

其中上点代表时间变化率,是传到系统的净热速率(负,如果来自系统), 是系统所有形式的净功率输入(负,如果是功率输出),是系统总能量含量的变化率.对于简单的可压缩系统,总能量由内能,动能和势能组成,以单位质量表示(见第2章)

请注意,总能量是一种属性,除非系统状态发生变化,否则其值不会改变.

热能Q传输

在日常生活中,我们经常将内能的可感知和潜在形式称为热,并谈论物体的热含量.从科学上讲,这些形式的能量更正确的名称是热能.对于单相物质,给定质量的热能变化会导致温度变化,因此温度是热能的良好代表.热能趋向于向温度降低的方向自然移动.由于温差而将能量从一个系统传递到另一个系统的过程称为**热传递**.例如,罐装饮料在较暖和的房间中加热是由于热传递(图5-48).传热的时间速率称为传热速率,用表示.

传热的方向总是从高温物体向低温物体.一旦温度相等,传热就会停止.温度相同的两个系统(或一个系统及其周围环境)之间不可能有任何净热传递.

没有热传递的过程称为**绝热[adiabatic]过程**.一个过程有两种绝热方式:要么系统绝缘良好,只有极少量的热量可以通过系统边界,要么系统和周围环境处于相同温度,因此没有驱动力(温差)用于净传热.绝热过程不应与等温过程混淆.即使在绝热过程中没有净传热,系统的能量含量和温度仍然可以通过其他方式改变,例如做功.

功W能量传递

如果能量相互作用与作用在一段距离内的力相关联,那么它就是**功**.上升的活塞,旋转轴和穿过系统边界的电线都与功相互作用有关。做功的时间速率称为功率,用W表示.汽车发动机和液压,蒸汽和燃气轮机产生功率（）;压缩机,泵,风扇和混合器消耗功率().

做功装置将能量传递给流体,从而增加流体的能量.例如,房间里的风扇可以调动空气并增加其动能.风扇消耗的电能首先由其电机转换为机械能,从而迫使叶片轴旋转.这种机械能然后转移到空气中,空气速度的增加证明了这一点.这种向空气传递的能量与温差无关,因此不可能是热传递.因此,它必须是功.由于不同速度的空气颗粒之间的摩擦,风扇排出的空气最终会停止并因此失去其机械能.但这并不是真正意义上的“损失”;它只是根据能量守恒原理将机械能转换为等量的热能(其价值有限,因此称为损失).如果风扇在密闭的房间里长时间运转,我们可以通过空气温度的升高感觉到这种热能的积累.

一个系统可能涉及多种形式的功,总功可以表示为:

其中是旋转轴传递的功,是控制面上压力所做的功,是控制面上粘性力的法向分量和剪切分量所做的功,是由其他力(如电,磁和表面张力)所做的功,这些力对于简单的可压缩系统来说是微不足道的,因此不在本文中考虑.我们也不考虑,因为移动壁(例如风扇叶片或涡轮机转轮)通常位于控制体积内,而不是控制面的一部分.但是应该记住,在对涡轮机械进行精细分析时,可能需要考虑在叶片剪切流体时由剪切力所做的功.

轴功

许多流动系统都涉及诸如泵,涡轮机,风扇,或轴伸出控制面的压缩机,与所有此类装置相关的功传递简称为轴功.通过旋转轴传递的动力与轴扭矩成正比,并表示为,

其中是以rad/s为单位的轴的角速度,是单位时间内轴的转数,通常以rev/min或rpm表示.

压力做功

考虑在图所示的活塞-气缸装置中压缩气体5-49a.当活塞在压力PA的影响下向下移动差分距离ds时,其中A是活塞的横截面积,对系统所做的边界功为.将这种关系的两边除以微分时间区间dt给出边界工作的时间率(即功率),

其中是活塞速度,即活塞面移动边界的速度.

现在考虑具有任意形状的流体材料块(一个系统),它随流动移动并在压力影响下自由变形,如图5-49b所示.压力总是向内并垂直于表面作用,作用在微分面积上的压力是.再次注意,功是力乘以距离,单位时间内行进的距离是速度,压力作用在系统的这个微分部分上的时间速率是,

因为速度通过微分区域的法向分量是.请注意,是dA的外法线,因此量对膨胀为正,对压缩为负.方程5-53中的负号确保压力所做的功在系统上完成时为正,当系统完成时为负,这与我们的符号约定一致.通过对整个表面A上的积分获得压力所做的总功,

根据这些讨论,净功率传输可以表示为,

则封闭系统能量守恒的速率形式变为,

为了获得**控制体积**的能量守恒关系,我们应用雷诺输运定理,将替换为总能量,将替换为每单位质量的总能量,即(图5-50).这产生,

将方程5-56的左侧代入方程5-57,适用于固定,移动或变形控制体积的能量方程的一般形式变为,

用文字表述为,

这里是相对于控制面的流体速度,乘积表示通过面积元素进入或离开控制体积的质量流量.再次注意,是的外向法线,因此数量和质量流量对于流出是正的,对于流入是负的.

将方程5-54中的压力功率的表面积分代入方程5-58,并将其与右侧的表面积分相结合,得到:

这是能量方程的一种方便形式,因为压力功现在与穿过控制面的流体能量相结合,我们不再需要处理压力功.

项是**流动功**,即与将流体推入或推出控制体积相关的每单位质量的功.请注意,由于无滑移条件,固体表面的流体速度等于固体表面的速度.因此,沿控制面与非移动固体表面重合的部分的压力功为零.因此,固定控制体积的压力功只能存在于控制面的虚部,流体进入和离开控制体积,即入口和出口.

对于固定的控制体积(控制体积没有运动或变形),并且能量方程方程5-59变为,

由于积分的原因,这个方程不是解决实际工程问题的方便形式,因此需要根据通过入口和出口的平均速度和质量流量来重写它.如果在入口或出口上几乎是均匀的,我们可以简单地将它移到积分之外.注意到是穿过入口或出口的质量流量,通过入口或出口的能量流入或流出的速率可以近似为.那么能量方程变为(图5-51),

其中(公式5-50)是控制体积和流动流的每单位质量的总能量.则,

或

其中我们使用了比焓的定义.最后两个方程是能量守恒的相当一般的表达,但它们的使用仍然仅限于固定的控制体积,入口和出口处的均匀流动,以及由于粘性力和其他影响而产生的可忽略不计的功.此外,下标“net in”代表“净输入”,因此如果传递到系统,则任何热量或功传递为正,如果从系统传出,则为负.

5-6 稳态流的能量分析

对于稳定流,控制体积的能量含量的时间变化率为零,方程5-63简化为,

它指出,在稳定流动期间,通过热量和功传递传递到控制体积的净能量速率等于质量流量的输出和输入能量流的速率之差.

许多实际问题只涉及一个入口和一个出口(图5-52).这种**单流装置**的质量流量在入口和出口处是相同的,公式5-64简化为,

其中下标1和2分别表示入口和出口.通过将公式5-65除以质量流量得到基于单位质量的稳态能量方程,

其中是每单位质量流体的净传热,是每单位质量流体的净轴功输入.使用焓的定义并重新排列,稳态能量方程也可以表示为,

其中是内能,是流动能,是动能,是流体的势能,都是单位质量的.这些关系对可压缩和不可压缩流都有效.

公式5-67的左侧代表机械能输入,而右侧的前三项代表机械能输出.如果流动是理想的,没有不可逆性(如摩擦),则总机械能必须守恒,括号中的项必须为零.也就是,

高于的任何增加都是由于机械能向热能的不可逆转换,因此表示每单位质量的机械能损失(图5-53).即,

对于单相流体(气体或液体),其中是定容比热.

基于单位质量的稳态能量方程可以方便地写成机械能平衡,

或

注意到,机械能平衡可以更明确地写为,

其中是机械功输入(由于存在泵,风扇,压缩机等),是机械功输出(由于涡轮机).当流动不可压缩时,可以使用绝对压力或表压,因为会出现在两侧并抵消.

将公式5-72乘以质量流量给出

其中是通过泵轴输入的轴功率,是通过涡轮轴输出的轴功率,是总机械功率损失,包括泵和涡轮机的损失以及管网中的摩擦损失.那是,

按照惯例,不可逆的泵和涡轮机损失与管道系统其他组件造成的不可逆损失分开处理(图5-54).因此,通过将公式5-73中的每一项除以,能量方程以其最常见的形式表示为水头.结果是,

其中是泵输送到流体的有用压头.由于泵中的不可逆损失,小于,系数为.

是由涡轮机从流体中去除的提取压头.由于涡轮机中的不可逆损失,比大,系数为.

是1和2之间的不可逆水头损失,这是由于除泵或涡轮机以外的管道系统的所有组件造成的.

请注意,水头损失表示与管道中流体流动相关的摩擦损失,它不包括由于这些设备的效率低下而导致泵或涡轮机内的损失 - 和考虑了这些损失.公式5-74示意性地显示在图5-55中.

如果管道系统不涉及泵,风扇或压缩机,则泵扬程为零;如果系统不涉及涡轮,则涡轮扬程为零.

特例:无机械功设备且摩擦可忽略的不可压缩流动

当管道损失可以忽略不计时,机械能向热能的耗散可以忽略不计,因此,如后面的示例5-11所示.此外,当没有风扇,泵或涡轮机等机械工作装置时,.然后等式5-74简化为,

这是早先使用牛顿第二运动定律推导出的**伯努利方程**.因此,伯努利方程可以被认为是能量方程的简并形式.

动能修正系数,

平均流速的定义使得关系式给出了实际的质量流速.因此,没有质量流量的校正因子之类的东西.然而,正如Gaspard Coriolis(1792-1843)所表明的,从获得的流体流的动能与流体流的实际动能不同,因为总和的平方不等于其分量的平方(图5-56).该误差可以通过将能量方程中的动能项替换为来校正,其中是**动能校正因子**.使用速度随径向距离变化的方程可以看出,完全发展的层流管流的校正因子为2.0,而圆管内完全发展的湍流的校正因子在1.04和1.11之间.

在基本分析中,动能校正因子经常被忽略(即𝛼等于1),因为(1)实践中遇到的大多数流动都是湍流,为此校正因子接近于1,以及(2)动能项是相对于能量方程中的其他项通常很小,将它们乘以一个小于2.0的因子并没有太大区别.当速度和动能高时,流动变成湍流,单位校正因子更合适.但是,您应该记住,您可能会遇到这些因素很重要的一些情况,尤其是当流动是层流时.因此,我们建议您在分析流体流动问题时始终包括动能校正因子.当包括动能修正因子时,稳态不可压缩流的能量方程(方程5-73和5-74)变为

如果入口或出口处的流动是完全发展的湍流管流,我们建议使用𝛼=1.05作为校正因子的合理估计.这导致了对水头损失的更保守的估计,并且不需要花费太多额外的努力就可以将𝛼包含在方程中.