流体流动分为**外部流动**或**内部流动**,这取决于流体是被迫流过表面还是在管道中流动.内部和外部流动表现出非常不同的特征.在本章中,我们考虑管道完全充满流体的内部流动,并且流动主要由压差驱动.这不应与明渠流(第13章)混淆,其中管道部分被流体填充,因此流部分由固体表面包围,如在灌溉沟渠中,并且流仅由重力驱动.

我们本章以通过管道和管道的内部流动的一般物理描述开始,包括入口区域和完全发达的区域.我们继续讨论减维数雷诺数及其物理意义.然后,我们介绍了与层流和湍流的管道流相关的压降相关性.然后,我们讨论微小损失并确定实际管道系统的压降和泵送功率要求.最后,我们简要概述了流量测量设备.

目标

读完本章后,您应该能够:

更深入地了解管道中的层流和湍流以及充分发展流的分析;

计算与管网中管流相关的主要和次要损失,并确定泵送功率要求;

了解各种速度和流量测量技术并了解它们的优缺点.

8-1节 介绍 2021年7月29日15点58分

通过管道或管道的液体或气体流动通常用于加热和冷却应用以及流体分配网络.这种应用中的流体通常被风扇或泵强制流过流动部分.我们特别注意摩擦,它与流经管道和管道时的压降和水头损失直接相关.然后使用压降来确定泵送功率要求.一个典型的管道系统包括通过各种配件或弯头相互连接的不同直径的管道来引导流体.控制流速的阀门和对流体加压的泵.

通常使用术语管道,导管可互换用于流动部分.一般情况下,圆形截面的流动截面被称为管道(特别是当流体为液体时),非圆形截面的流动截面称为导管(特别是当流体为气体时).小直径管道通常称为管.鉴于这种不确定性,我们将在必要时使用更多描述性短语(例如圆形管道或矩形管道)以避免任何误解.

您可能已经注意到,大多数流体,尤其是液体,都是在圆形管道中运输的.这是因为具有圆形横截面的管道可以承受内部和外部之间的巨大压力差而不会发生显着变形.非圆形管道通常用于压差较小,制造和安装成本较低,管道系统可用空间有限的应用,例如建筑物的供暖和制冷系统(图8-1).

尽管理论上流体流动的概念很好地理解,理论解仅适用于少数简单情况,例如圆形管道中完全发展的层流.因此,对于大多数流体流动问题,我们必须依靠实验结果和经验关系,而不是封闭形式的解析解.注意到实验结果是在严格控制的实验室条件下获得的,并且没有两个系统是完全相同的,我们不能天真地认为获得的结果是“精确的”.使用本章中的关系式计算的摩擦系数的 10%(或更多)误差是“标准”而不是“例外”.

由于无滑移条件,管道中的流体速度在壁处从零变化在管道中心达到最大值.在流体流动中,使用平均速度很方便,当管道的横截面积恒定时,它在不可压缩流动中保持恒定(图8-2).由于密度随温度的变化,加热和冷却应用中的平均速度可能会有所变化.但是,在实践中,我们在某个平均温度下评估流体特性并将它们视为常数.使用恒定特性的便利性通常不仅仅证明精度的轻微损失是合理的.

此外,由于机械能转换为管道中流体颗粒之间的摩擦,确实会导致流体温度略有升高显热能.但是由于摩擦加热引起的这种温升通常太小而不能保证在计算中进行任何考虑,因此被忽略.例如,在没有任何热传递的情况下,在管道中流动的水的入口和出口温度之间没有明显的差异.流体流动摩擦的主要结果是压降,因此流体中任何显着的温度变化都是由于热传递.

某些流向横截面的平均速度的值是根据满足质量守恒原理的要求确定的(图8-2).即

其中是质量流量,𝜌是密度,Ac是横截面积,而 u(r) 是速度分布.则半径为R的圆管中不可压缩流动的平均速度表示为,

因此,当我们知道流量或速度分布时,可以很容易地确定平均速度.

**8-2 层流和湍流** 2021年7月29日16点25分

如果您身边有吸烟者,您可能会注意到香烟烟雾在最初几厘米以平滑的羽状上升,然后在继续上升时开始向各个方向随机波动.其他羽流的行为类似(图 8-3).同样,仔细检查管道中的流动会发现,流体流动在低速时呈流线型,但随着速度增加到临界值以上而变得混乱,如图8-4所示.第一种情况的流态据说是**层流[laminar]**,其特征是平滑的流线和高度有序的运动,而在第二种情况下是**湍流[turbulent]**,其特征是速度波动和高度无序的运动.从层流到湍流的**转变[transition]**不是突然发生的;相反,它发生在某个区域,在该区域中,流动在变成完全湍流之前在层流和湍流之间波动.实践中遇到的大多数流动都是湍流.当油等高粘度流体在小管道或狭窄通道中流动时,就会遇到层流.

正如英国工程师Osborne Reynolds(1842–1912)一个多世纪前所做的那样,我们可以通过将一些染料条纹注入玻璃管中的流中来验证这些层流,过渡流和湍流流态的存在.我们观察到,当流动是层流时,染料条纹在低速下形成一条直线和平滑的线(我们可能会看到由于分子扩散而造成的一些模糊),在过渡状态中有爆发性的波动,并且当流动变成时迅速而无序地曲折完全动荡.这些锯齿形和染料的分散表明主流的波动和来自相邻层的流体颗粒的快速混合.

由于快速波动,流体在湍流中的强烈混合增强了流体颗粒之间的动量传递,从而增加了管壁上的摩擦力,从而增加了所需的泵送功率.当流动变得完全湍流时,摩擦系数达到最大值.

**雷诺数**

从层流到湍流的转变取决于几何形状,表面粗糙度,流速,表面温度和流体类型等.在1880年代进行详尽的实验后,Osborne Reynolds 发现流动状态主要取决于流体中惯性力与粘性力的比值(图8-5).这个比率称为**雷诺数[Reynolds number]**,并表示为圆形管道中的内部流动,

其中,D=几何特征的长度(在本例中为直径,单位为m),以及流体的运动粘度().请注意，雷诺数是一个无量纲量(第7章).此外,运动粘度的单位为,可以看作是**粘性扩散率**或**动量扩散率**.

在雷诺数较大时,与流体密度和流体速度的平方成正比的惯性力相对于粘性力比较大,因此粘性力不能阻止流体的随机和快速波动.然而,在小或中等雷诺数下,粘性力足够大以抑制这些波动并使流体保持“一致”.因此,在第一种情况下流动是湍流,在第二种情况下是层流.

流动变成湍流时的雷诺数称为**临界雷诺数**.对于不同的几何形状和流动条件,临界雷诺数的值是不同的.对于圆形管道中的内部流动,普遍接受的临界雷诺数值为.

对于通过非圆形管道的流量,雷诺数基于**水力直径[hydraulic diameter]**定义为(图8-6)

其中是管道的横截面积,是其润湿周长.水力直径的定义使得它减小到圆形管道的普通直径 D,

对于层流,过渡流和湍流,肯定需要精确的雷诺数值,但实际上并非如此.事实证明,从层流到湍流的转变还取决于表面粗糙度,管道振动和上游流动的波动对流动的扰动程度.在大多数实际条件下,圆管中的流动对于是层流,对于是湍流,并在两者之间过渡.即,

在过渡流中,流动在层流和湍流之间以无序的方式切换(图8-7).应该记住,通过避免流动扰动和管道振动,可以在非常光滑的管道中将层流保持在高得多的雷诺数.在这种精心控制的实验室实验中,层流一直保持在高达100,000的雷诺数.

**8-3 入口区** 2021年7月29日17点12分

考虑以均匀速度进入圆形管道的流体.由于无滑移条件,与管壁接触的层中的流体粒子完全停止.由于摩擦,该层还导致相邻层中的流体粒子逐渐减慢.为了弥补这种速度的降低,管道中间部分的流体速度必须增加,以保持通过管道的质量流量恒定.结果,沿管道发展了速度梯度.

可以感受到流体粘性引起的粘性剪切力影响的流动区域称为**速度边界层**或仅**边界层**.假设边界表面将管道中的流动分为两个区域:**边界层区域**,其中粘性效应和速度变化显着,以及**无旋(核心)流动区域**,其中摩擦效应可以忽略不计,速度在径向上基本保持恒定.

该边界层的厚度在流动方向上增加,直到边界层到达管道中心并因此充满整个管道,如图 8-8 所示，并且速度在更远的下游完全发展.从管道入口到速度剖面完全发展点的区域称为**流体动力入口区域**,该区域的长度称为**流体动力入口长度**.入口区域的流动称为**流体动力学发展流**,因为这是速度分布发展的区域.速度分布完全发展并保持不变的入口区以外的区域称为**流体动力完全发展区**.当归一化温度分布也保持不变时,流动被认为是**完全发展的**.当管道中的流体没有被加热或冷却时,流体动力学完全发展的流动等效于完全发展的流动,因为在这种情况下流体温度始终保持基本恒定.由于涡流运动和径向更剧烈的混合,完全发展区域的速度分布在层流中呈抛物线形,在湍流中呈透镜状.当流动完全发展时,时间平均速度分布保持不变,因此,

管壁处的剪应力与表面速度分布的斜率有关.注意到在流体动力完全发展区域的速度剖面保持不变,壁面剪切应力在该区域也保持不变(图8-9).

考虑管道流体动力入口区域中的流体流动.壁面剪应力在边界层厚度最小的管道入口处最大,并逐渐减小至完全展开值,如图8-10所示.因此,管道入口区域的压降较高,入口区域的作用总是增加整个管道的平均摩擦系数.这种增加对于短管来说可能是显着的,但对于长管来说可以忽略不计.

**入口长度**

流体动力入口长度通常被认为是从管道入口到壁面剪切应力(因此摩擦系数)达到完全发展值的2%以内的距离.在层流中,无量纲流体动力入口长度近似为[参见 Kays 和 Crawford (2004) 以及 Shah 和 Bhatti (1987)]

对于,流体动力入口长度大约是直径的大小,但随速度线性增加.在的极限层流情况下,流体动力入口长度为115D.

在湍流中,随机波动期间的强烈混合通常会掩盖分子扩散的影响.湍流的无量纲水动力入口长度近似为[参见 Bhatti 和 Shah (1987)和Zhi-qing(1982)],

与高雷诺数层流相比,湍流中的入口长度要短得多,正如预期的那样,并且其对雷诺数的依赖性更弱.在许多具有实际工程意义的管道流中,超过大约10直径的管道长度,入口效应变得微不足道,并且无量纲水动力入口长度近似为,

文献中提供了计算入口区域摩擦水头损失的精确相关性.然而,实际使用的管道通常是入口区域长度的几倍,因此通常假设通过管道的流量在管道的整个长度上都充分发展.这种简单的方法对于长管道给出了合理的结果,但对于短管道有时结果很差,因为它低估了壁面剪应力,从而低估了摩擦系数.

**8-4 管道中的层流** 2021年7月29日18点30分

我们在第8-2节中提到,当时,管道中的流动是层流的,如果管道足够长(相对于入口长度),则流动是完全发展的,因此入口效应可以忽略不计.在本节中,我们考虑在直圆管的完全发展区域中具有恒定特性的稳定,层流,不可压缩的流体流动.我们通过将动量平衡应用于微分体积元素来获得动量方程,并通过求解它获得速度分布.然后我们用它来获得摩擦系数的关系.此处分析的一个重要方面是它是少数可用于粘性流的方法之一.

在完全发展的层流中,每个流体粒子沿流线以恒定的轴向速度移动,并且速度分布在流动方向上保持不变.径向没有运动,因此垂直于管轴方向的速度分量处处为零.由于流动稳定且充分发展,因此没有加速度.

现在考虑一个半径为,厚度为,长度为的环形微分体积单元,它与管道同轴,如图8-11所示.体积元素只涉及压力和粘性效应,因此压力和剪切力必须相互平衡.作用在浸没平面上的压力是表面质心处的压力与表面积的乘积.体积元素在流动方向上的力平衡给出,

这表明在水平管道中完全发展的流动中,粘性力和压力相互平衡.除以并重新排列,

但是我们认识到方程8-10中的两个分子分别是和.因此,

代入,除以r,取得到期望的方程,

管道流量中的量为负,包含负号以获得𝜏的正值.(或者,,如果我们定义.)方程的左侧8-12是r的函数,右边是x的函数.等式必须对r和x的任何值成立,并且只有当f(r)和g(x)都等于相同的常数时,才能满足形式为的等式.因此我们得出结论常数.这是通过在半径为R和厚度为dx的体积元素(如图8-12中的管道切片)上编写力平衡来验证的,它给出,

这里是常数,因为粘度和速度分布在完全发展的区域是常数.因此,常数.

方程8-12通过重新排列和积分两次得到解,

速度分布是通过在处应用边界条件(因为关于中心线对称)和在处(管道墙处的无滑移条件)获得的,

因此,管道中完全发展的层流中的速度分布是抛物线形的,最大值在中心线，最小值（零）在管壁.此外,对于任何r,轴向速度u都是正的,因此轴向压力梯度必须为负(即,由于粘性效应,压力必须在流动方向上减小——推动流体通过管道需要压力).

通过将方程8-15代入方程8-2并进行积分,根据其定义确定平均速度,得到

结合最后两个方程,速度分布改写为,

这是速度剖面的一种方便形式，因为可以很容易地从流速信息中确定.最大速度出现在中心线处,通过代入由公式8-17确定,

因此,完全发展的层流管流中的平均速度是最大速度的二分之一.

**压降和压头损失**

管道流量分析中一个有趣的量是**压降[pressure drop]**,因为它与风扇或泵维持流量的功率要求直接相关.我们注意到常数,并且从压力为的到压力为的积分给出,

将方程8-19代入方程8-16中的表达式,压降表示为,

符号通常用于表示最终值和初始值之间的差.但在流体流动中,用于表示压降,因此它是.由粘性效应引起的压降代表不可逆的压力损失,有时称为**压力损失**以强调它是一种损失(就像水头损失,我们将看到它与成正比).

注意公式8-20表明压降与流体的粘度𝜇成正比,如果没有摩擦,将为零.因此,在这种情况下,压力从下降​​到完全是由于粘性效应,公式8-20表示当粘度为𝜇的流体以平均速度流过恒定直径D和长度L的管道时的压力损失.

在实践中,可以方便地将所有类型的完全发展的内部流动(层流或湍流,圆形或非圆形管道,光滑或粗糙表面,水平或倾斜管道)的压力损失表示为(图8-13),

其中是**动压力**,是**达西摩擦系数[Darcy friction factor]**,

也称为达西-魏斯巴赫摩擦系数,以法国人亨利·达西(1803-1858)和德国人朱利叶斯·魏斯巴赫(1806-1871)的名字命名,为它的发展做出最大贡献的两位工程师.它不应与**摩擦系数**[也称为**范宁摩擦系数**,以美国工程师约翰·范宁(John Fanning,1837–1911)的名字命名]混淆,其定义为.

设置方程8-20和8-21彼此相等并求解给出了圆形管道中完全发展的层流的摩擦系数,

该方程表明,在层流中,摩擦系数**仅是雷诺数的函数,与管道表面的粗糙度无关(当然,假设粗糙度不是极端的)**.

在管道系统分析中,压力损失通常用等效液柱高度表示,称为**水头损失**.从流体静力学中注意到,因此的压差对应于的流体高度,通过将除以得到管道水头损失,

水头损失表示**流体需要通过泵提升以克服管道中的摩擦损失的附加高度**.水头损失是由粘度引起的,它与壁面剪切应力直接相关.方程8-21和8-24对圆形和非圆形管道中的层流和湍流均有效,但方程8-23仅对圆形管道中完全发展的层流有效.

一旦知道压力损失(或水头损失),克服压力损失所需的泵送功率由下式确定:

其中是体积流量,是质量流量.

水平管道中层流的平均速度是,根据公式 8-20,

那么通过直径为D,长度为L的水平管的层流的体积流量变为,

这个方程被称为**泊肃叶[Poiseuille]定律**,这个流被称为哈根-泊肃叶流,以纪念G.Hagen(1797-1884)和 J.Poiseuille (1799-1869)在这个主题上的工作.从公式8-27可以看出,**对于指定的流量,压降和所需的泵送功率与管道长度和流体粘度成正比,但与泵的管道的半径(或直径)四次方成反比**.因此,通过将管道直径加倍,层流管道系统的泵送功率要求可以降低16倍(图8-14).当然,由于使用更大直径的管道,必须权衡降低能源成本的好处与增加的建设成本.

在水平管道的情况下,压降等于压力损失,但对于倾斜管道或具有可变横截面积的管道,情况并非如此.这可以通过将稳定的,不可压缩的一维流动的能量方程写成水头来证明(见第5章)

其中是输送到流体的有用泵压头,是从流体中提取的涡轮压头,是1和2部分之间的不可逆水头损失,和是第1和第2部分的平均速度,和是第1和第2部分的动能校正因子(可以证明,对于完全发展的层流,𝛼=2,对于完全发展的湍流,大约为1.05).公式8-28可以重新排列为,

因此,对于给定的流动截面.压降和压力损失是等效的,如果(1)流动截面是水平的,因此没有流体静力或重力效应,(2)流动截面不涉及任何做功装置,例如泵或涡轮机,因为它们会改变流体压力(),(3)流动截面的横截面积是恒定的,并且因此平均流速是恒定的,并且(4)第1和第2部分的速度分布具有相同的形状().

**重力对层流速度和流速的影响**

重力对水平管道中的流动没有影响,但它对上坡或下坡管道的速度和流速都有显着影响.倾斜管道的关系可以类似的方式从流动方向上的力平衡中获得.在这种情况下,唯一的额外力是流体重量在流动方向上的分量,其大小为,

其中是水平方向和流动方向之间的夹角(图 8-15).方程8-9中的力平衡现在变为,

这导致微分方程,

按照与之前相同的求解过程,速度剖面是,

从方程8-33,层流通过倾斜管道的平均速度和体积流量关系分别为

与水平管的对应关系相同,只是将替换为.因此,如果将替换为(图8-16).注意并且因此为上坡流,而并且因此为下坡流.

在倾斜管道中,压力差和重力的共同作用驱动流动.重力有助于下坡流动,但反对上坡流动.因此,需要施加更大的压力差以在上坡流中保持指定的流速,尽管这仅对液体变得重要,因为气体的密度通常较低.在没有流动()的特殊情况下,方程8-34产生,这是我们从流体静力学中得到的(第3章).

**非圆形管道中的层流**

表8-1中给出了各种横截面管道中完全发展的层流的摩擦系数关系.这些管道中流动的雷诺数基于水力直径,其中是管道的横截面积,是其湿周长.

**8-5 管道中的湍流** 2021年7月30日12点07分

工程实践中遇到的大多数流动都是湍流,因此了解湍流如何影响壁面剪应力非常重要.然而,湍流是一种以波动为主的复杂机制,尽管研究人员在这方面做了大量的工作,但湍流仍然没有被完全理解.因此,我们必须依靠实验和针对各种情况开发的经验或半经验相关性.

湍流的特点是在整个流动过程中流体的旋流区域(称为**涡流[eddies]**)的无序和快速波动(图8-19).这些波动为动量和能量转移提供了额外的机制.在层流中,流体粒子沿路径有序流动,动量和能量通过分子扩散穿过流线传递.在湍流中,涡流将质量,动量和能量传输到其他流动区域的速度比分子扩散快得多,大大增强了质量,动量和热传递.因此,湍流与更高的摩擦,传热和传质系数值相关(图8-20).

即使平均流动是稳定的，湍流中的涡动也会引起速度,温度,压力甚至密度(在可压缩流中)值的显着波动.图8-21显示了指定位置处瞬时速度分量u随时间的变化,可以使用热线风速计探头或其他敏感设备进行测量.我们观察到速度的瞬时值围绕平均值波动,这表明速度可以表示为平均值和波动分量的总和,

对于其他属性也是如此,例如y方向上的速度分量,因此,和.某个位置的属性的平均值是通过在足够大的时间间隔内对其进行平均来确定的,该时间间隔足以使时间平均值趋于恒定.因此,波动分量的时间平均值为零,例如.的大小通常只是的百分之几,但涡流的高频(每秒一千个数量级)使它们对于动量,热能和质量的传输非常有效.在时间平均的平稳湍流中,属性的平均值(由上条表示)与时间无关.流体粒子的混沌波动在压降中起主导作用,在分析中必须将这些随机运动与平均速度一起考虑.

也许首先想到的是以类似于层流的方式确定剪切应力来自的流量,其中是湍流的平均速度剖面.但实验研究表明情况并非如此,由于湍流波动,有效剪应力要大得多.因此,可以方便地将湍流剪切应力视为由两部分组成:层流分量,它解释了流动方向上层之间的摩擦(表示为),以及湍流分量,这说明了波动的流体粒子和流体体之间的摩擦(表示为并且与速度的波动分量有关).那么湍流中的总剪应力可以表示为,

图8-22给出了管道中湍流的典型平均速度分布和剪切应力的层流和湍流分量的相对大小.请注意,虽然速度剖面在层流中近似为抛物线形,但在湍流中变得更平坦或更“更饱满”,在管壁附近急剧下降.丰满度随着雷诺数的增加而增加,并且速度剖面变得更接近均匀,这为完全发展的湍流管流的常用均匀速度剖面近似提供了支持.但是请记住,固定管道壁上的流速始终为零(无滑动条件).

**湍流剪切应力**

考虑水平管道中的湍流,由于速度波动,流体粒子从较低速度层到相邻较高速度层的涡旋向上运动,通过微分面积,如图8=23所示.上升通过的流体粒子的质量流量为,它对之上的层的净影响是其平均流速的降低,因为动量转移到具有较低平均流速的流体粒子.这种动量传递导致流体粒子的水平速度增加,因此它在水平方向上的动量以的速率增加,该速率必须等于上流体层的动量的减少.注意到给定方向上的力等于该方向上的动量变化率,由于流体粒子通过而作用在以上的流体元素上的水平力是.因此,流体粒子涡旋运动引起的单位面积剪切力可以看作是瞬时湍流剪切应力.那么**湍流剪应力**可以表示为,

其中是波动速度分量和乘积的时间平均值.注意,即使和(因此),实验结果表明通常是一个负数.诸如或之类的项被称为**雷诺应力**或**湍流应力**.

已经开发了许多半经验公式,根据平均速度梯度对雷诺应力进行建模,以便为运动方程提供数学闭合.此类模型称为**湍流模型**,在第15章中进行了更详细的讨论.

粒子群的随机涡动运动类似于气体中分子的随机运动——经过一定距离后相互碰撞并在此过程中交换动量.因此,湍流中涡旋的动量传递类似于分子动量扩散.在许多更简单的湍流模型中,湍流剪应力以类似的方式表示,正如法国数学家Joseph Boussinesq(1842-1929)在1877年提出的那样

其中是**涡粘性[eddy viscosity]**或**湍流粘性[turbulent viscosity]**,它解释了湍流涡动的动量传输.那么总剪应力可以方便地表示为,

其中是**运动涡粘度**或**运动湍流粘度**(也称为动量的涡扩散系数).涡流粘度的概念非常吸引人,但除非可以确定其值,否则它没有实际用途.换句话说,涡粘性必须被建模为平均流动变量的函数;我们称之为涡粘性闭合.例如,在1900年代初期,德国工程师L.Prandtl引入了**混合长度**的概念,它与主要负责混合的涡流的平均尺寸有关,并将湍流剪应力表示为,

但是这个概念的用途也很有限,因为对于给定的流量,不是常数(例如,在墙附近,几乎与到墙的距离成正比),而且它的确定并不容易.只有当被写为平均流动变量,与壁的距离等的函数时,才能获得最终的数学闭合.

涡流运动和涡流扩散比它们在湍流边界核心区域的分子对应物大得多层.由于无滑移条件(在静止壁上和为零),涡流在靠近壁的地方失去强度,并在壁处减弱.因此,湍流边界层核心区域的速度剖面变化非常缓慢,但在靠近壁的薄层中非常陡峭,导致壁面的速度梯度很大.因此,湍流中的壁面剪应力比层流中的大得多也就不足为奇了(图8-24).

请注意,动量(以及)的分子扩散率是流体属性,其值列在流体手册中.然而,涡流扩散率以及 𝜇t)不是流体属性,其值取决于流动条件.涡流扩散系数朝着壁面减小,在壁面处变为零.它的值范围从壁面的零到核心区域分子扩散率值的数千倍.

**湍流速度剖面**

与层流不同,湍流中速度剖面的表达式基于分析和测量,因此它们本质上是半经验的,常数由实验数据确定.考虑管道中完全发展的湍流,让表示轴向上的时间平均速度(因此为了简单起见,从中去掉上横杠).

图8-25 给出了完全发展的层流和湍流的典型速度分布.请注意,层流中的速度分布是抛物线形的,但在湍流中更饱满,在管壁附近急剧下降.可以认为沿壁的湍流由四个区域组成,以与壁的距离为特征(图8-25).粘性效应占主导地位的靠近壁的非常薄的层是**粘性**(或层流或线性或壁)**子层**.该层中的速度剖面非常接近线性,并且流动是流线型的.粘性子层旁边是**缓冲层[buffer layer]**,其中湍流效应变得显着,但流动仍以粘性效应为主.缓冲层上方是**重叠[overlap]**(或**过渡**)**层**,也称为**惯性[inertial]子层**,其中湍流效应更为显着,但仍不占主导.在此之上是流动的剩余部分中的**外**(或**湍流**)**层**,其中湍流效应在分子扩散(粘性)效应上占主导地位.

不同区域的流动特性有很大差异,因此很难像我们对层流所做的那样对整个流动的速度剖面提出解析关系.事实证明,湍流情况下的最佳方法是使用量纲分析确定关键变量和函数形式,然后使用实验数据来确定任何常数的数值.

粘性子层的厚度非常小(通常远小于管道直径的1%),但由于它涉及大的速度梯度,靠近壁的这一薄层对流动特性起着主导作用.壁会抑制任何涡流运动,因此该层中的流动基本上是层流,剪切应力由与流体粘度成正比的层流剪切应力组成.考虑到速度在有时不比头发粗的层上从零变化到接近核心区域值(几乎像阶跃函数),我们预计该层中的速度分布非常接近线性,并且实验确认那个.然后粘性子层中的速度梯度在时几乎保持不变,壁面剪应力可以表示为

其中是与墙壁的距离(注意对于圆形管道,y=R-r).量在湍流速度剖面的分析中经常遇到.的平方根具有速度的量纲，因此可以方便地将其视为虚拟速度,称为**摩擦速度**,表示为.将其代入方程8-41,粘性子层中的速度剖面以无量纲形式表示为

这个方程被称为**壁面定律**,发现它与光滑表面的实验数据满足的相关性.因此,粘性子层的厚度大致为,

其中是粘性子层边缘的流速(其中）,它与管道中的平均速度密切相关.因此我们得出结论,**粘性亚层的厚度与运动粘度成正比,与平均流速成反比**.换句话说,粘性子层受到抑制,并且随着速度(以及雷诺数)的增加而变薄.因此,速度分布变得几乎平坦,因此在非常高的雷诺数下速度分布变得更加均匀.

量有长度的量纲,称为**粘性长度**;它用于对距表面的距离y进行无量纲化.在边界层分析中,使用无量纲距离和无量纲速度定义为很方便,

那么墙的法则(方程8-42)就变得简单了,

请注意,摩擦速度用于对和进行无量纲化,而类似于雷诺数表达式.

在重叠层中,观察到速度的实验数据在绘制时与距墙的距离的对数成一条直线.量纲分析表明,实验证实重叠层中的速度与距离的对数成正比,速度剖面可表示为,

其中和是常数,其值分别通过实验确定为约0.40和5.0.公式8-46被称为**对数定律**.代入常数值,速度分布确定为,

事实证明,方程8-47中的对数定律令人满意地表示了整个流动区域的实验数据,除了非常靠近壁和靠近管道中心的区域,如图8-26所示,因此它是被视为管道中或表面上湍流的通用速度分布.从图中可以看出,当时,对数律速度剖面非常准确,但缓冲层中的速度剖面都不准确,即区域.此外,粘性子层在缓冲层中显得大得多.因为我们使用对数刻度来表示与壁的距离.

管道流动的外部湍流层的良好近似值可以通过根据管道中出现最大速度的要求评估公式8-46中的常数B来获得在的中心线处.通过设置和,从方程8-46中求解B,并将其与一起代回方程8-46得到

速度与中心线值的偏差称为速度缺陷,方程8-48称为**速度缺陷[defect]定律**.这种关系表明,管道中湍流核心区域的归一化速度分布取决于与中心线的距离,并且与流体的粘度无关.这并不奇怪,因为涡动在该区域占主导地位,并且流体粘度的影响可以忽略不计.

对于湍流管道流动,存在许多其他经验速度分布.其中,最简单和最著名的是**幂律速度分布**,表示为,

其中指数是一个常数,其值取决于雷诺数.n的值随着雷诺数的增加而增加.值在实践中通常近似于许多流量,从而产生七分之一幂律速度剖面这一术语.

图8-27中显示了和10的各种幂律速度分布以及完全发展的层流的速度分布以供比较.请注意,湍流速度剖面比层流剖面更完整,并且随着n(因此雷诺数)的增加而变得更加平坦.另请注意,幂律曲线不能用于计算壁面剪应力,因为它在那里给出了无穷大的速度梯度,并且无法在中心线处给出零斜率.但是这些差异区域构成了整个流动的一小部分,幂律曲线为通过管道的湍流提供了高度准确的结果.

尽管粘性子层的厚度很小(通常远小于管道直径的1%),但该层中的流动特性非常重要,因为它们为管道其余部分的流动奠定了基础.表面上的任何不规则或粗糙度都会干扰该层并影响流动.因此,与层流不同,湍流中的摩擦系数是表面粗糙度的强函数.

应该记住,粗糙度是一个相对概念,当它的高度与粘性子层的厚度(它是雷诺数的函数)相当时,它就具有意义.在具有足够放大倍数的显微镜下,所有材料都显得“粗糙”.在流体力学中,当粗糙的山丘突出粘性底层时,表面的特征是粗糙的.当底层淹没粗糙元素时,表面被称为流体动力学光滑.玻璃和塑料表面通常被认为是流体动力学光滑的.

**穆迪图及其相关方程**

充分发展的湍流管道流动中的摩擦系数取决于雷诺数和**相对粗糙度**,即管道粗糙度的平均高度与管道直径的比值.这种依赖的函数形式无法从理论分析中获得,所有可用的结果都是从使用人工粗糙表面(通常通过在管道内表面粘上已知尺寸的砂粒)的艰苦实验中获得的.大多数这样的实验是由普朗特的学生J. Nikuradse在1933年进行的,其次是其他人的工作.摩擦因数由流速和压降的测量值计算.

实验结果以表格,图形和通过曲线拟合实验数据获得的函数形式呈.1939年,Cyril F. Colebrook(1910-1997)将光滑管道和粗糙管道中过渡和湍流的可用数据组合成以下隐式关系(图8-28),称为**Colebrook方程**:

我们注意到公式8-50中的对数是以10为底的,而不是自然对数.1942年,美国工程师Hunter Rouse(1906-1996)验证了Colebrook方程并绘制了f作为Re和乘积的函数的图形.他还介绍了层流关系和商业管道粗糙度表.两年后,Lewis F. Moody(1880-1953)将Rouse的图表改写成今天常用的形式.现在著名的**穆迪图表[Moddy chart]**在附录中给出,如图A-12.它将管道流动的达西摩擦系数作为雷诺数和的函数在很宽的范围内呈现.它可能是工程中最广泛接受和使用的图表之一.虽然它是为圆形管道开发的,但也可以通过将直径替换为水力直径来用于非圆形管道.

市售的管道与实验中使用的管道不同,市场上管道的粗糙度不均匀,难以准确描述.表8-2和穆迪图表中给出了一些商业管道的等效粗糙度值.但应该记住,这些值是针对新管道的,管道的相对粗糙度可能会随着使用而增加,因为腐蚀,结垢和沉淀.因此,摩擦系数可能会增加5到10倍.在设计管道系统时必须考虑实际操作条件.此外,穆迪图及其等效的Cole-brook方程涉及若干不确定性(粗糙度大小,实验误差,数据曲线拟合等),因此不应将获得的结果视为“精确”.它们通常被认为在图中的整个范围内精确到±15%.

我们从穆迪图中得出以下观察结果:

对于层流,摩擦因数随着雷诺数的增加而减小,并且与表面粗糙度无关.

* 对于光滑的管道,摩擦因数是最小值(但仍然不为零,因为无滑移条件)并随着粗糙度的增加而增加(图8-29).在这种情况下,Colebrook方程简化为表示为Prandtl方程,.
* 从层流状态到湍流状态(2300 < Re < 4000)的过渡区域由穆迪图中的阴影区域表示(图8-30和A-12).该区域的流动可能是层流或湍流,这取决于流动扰动,或者它可能在层流和湍流之间交替,因此摩擦系数也可能在层流和湍流值之间交替.这个范围内的数据是最不可靠的.在较小的相对粗糙度下,过渡区域的摩擦系数增加并接近光滑管道的值.
* 在非常大的雷诺数(在穆迪图上的虚线右侧)时,对应于指定相对粗糙度曲线的摩擦系数曲线为几乎是水平的,因此摩擦系数与雷诺数无关(图8-30).该区域的流动称为**完全粗糙湍流**或**完全粗糙流**,因为粘性子层的厚度随着雷诺数的增加而减小,并且变得非常薄,与表面粗糙度高度相比小到可以忽略不计.在这种情况下,粘性效应主要由突出的粗糙元素在主流中产生,粘性子层的贡献可以忽略不计.完全粗糙区(Re→∞)中的 Colebrook方程简化为表示为**von Kármán 方程**,,这在f中是明确的,一些作者称该区域为完全(或完全)湍流,但这是一种误导,因为图8-30中蓝色虚线左侧的流也是完全湍流.

在计算中,我们应确保使用实际管道的内径,可能与公称直径不同.例如,公称直径为1英寸的钢管的内径为1.049英寸(表8-3).

**流体流动问题的类型**

在涉及使用穆迪图(或科尔布鲁克方程)的管道系统设计和分析中,我们通常会遇到三种类型的问题(假设在所有情况下都指定了管道的流体和粗糙度)(图8-31).

1. 在给定管道长度和直径时确定指定流量(或速度)时的压降(或水头损失);
2. 在给定管道长度和直径时确定指定压降（或水头损失）时的流量;
3. 在给定管道长度和流量时确定指定压降（或水头损失）时的管道直径.

第一类问题很简单,可以使用穆迪图直接解决.第二类和第三类问题在工程设计中比较常见(比如管径的选择,尽量减少施工和泵送费用的总和),但使用穆迪图解决此类问题需要迭代方法——推荐使用方程求解器.

在第二种类型的问题中,直径是给定的,但流速是未知的.在这种情况下,摩擦因数的一个很好的猜测是从给定粗糙度的完全湍流区域获得的.这对于大雷诺数来说是正确的,这在实践中经常发生.一旦获得流量,就使用穆迪图或科尔布鲁克方程修正摩擦系数,并重复该过程直到解收敛.(通常只需几次迭代即可收敛到三或四位数的精度.)

在第三类问题中,直径未知,因此无法计算雷诺数和相对粗糙度.因此,我们通过假设管道直径开始计算.然后将针对假定直径计算的压降与指定压降进行比较,并以迭代方式对另一个管道直径重复计算,直到收敛.

为了避免在水头损失,流速和直径计算中进行繁琐的迭代,Swamee和Jain(1976)提出了以下明确的关系,精确到穆迪图的2%以内:

请注意,当使用一致的单位时,所有数量都是有量纲的,并且单位会简化为所需的单位(例如,最后一个关系中的m或ft).注意到穆迪图精确到实验数据的15%以内,我们应该毫无保留地在管道系统设计中使用这些近似关系.

Colebrook方程隐含在f中,因此摩擦系数的确定需要迭代.S.E.Haaland在1983年给出了 的近似显式关系:

从这种关系中得到的结果与从Colebrook方程得到的结果相差不到2%.如果需要更准确的结果,当使用可编程计算器或电子表格通过公式8-50求解f时,公式8-54可以用作牛顿迭代中的一个很好的第一次猜测.

我们通常使用Colebrook 方程来计算完全发展的湍流管流的摩擦系数f.事实上,穆迪图是使用科尔布鲁克方程创建的.然而,除了隐含之外,Colebrook方程仅适用于湍流管道流动(当流动为层流时,）.因此,我们需要验证雷诺数是否在湍流范围内.Churchill(1997)生成了一个方程,该方程不仅是明确的,而且对于任意和任何粗糙度都很有用,甚至对于层流,甚至在层流和湍流之间的模糊过渡区域也是如此. **Churchill方程**是

其中

Colebrook方程和 Churchill方程之间的差异小于1%.因为它在雷诺数和粗糙度的整个范围内是明确和有效的,所以建议使用Churchill方程来确定摩擦系数.

**8-6 小损失** 2021年7月30日16点42分

除了管道的直线段外,典型管道系统中的流体还通过各种配件,阀门,弯头,弯头,三通,入口,出口,膨胀和收缩.这些成分会中断流体的平稳流动并由于它们引起的流动分离和混合而导致额外的损失.在具有长管道的典型系统中,这些损失与直管段的水头损失(**主要损失**)相比较小,称为**小损失**.尽管这通常是正确的,但在某些情况下,次要损失可能大于主要损失.例如,在短距离内有多圈和阀门的系统中就是这种情况.例如,完全打开的阀门引入的水头损失可以忽略不计.但部分关闭的阀门可能会导致系统中最大的水头损失,如流速下降所证明的那样.通过阀门和配件的流量非常复杂,理论上的分析通常是不合理的.因此,较小的损耗通常由组件的制造商通过实验确定.

小损耗通常用**损耗系数**(也称为**阻力系数**)表示,定义为(图8-36)

其中是由组件插入引起的管道系统中额外的不可逆水头损失,定义为.例如,想象用一段从位置1到位置2的恒定直径管道替换图8-36中的阀门.对于有阀门的情况,定义为从1到2的压降,,减去在没有阀门的情况下从1到2的假想直管段中出现的压降,管道在相同的流速下.虽然大部分不可逆水头损失发生在阀门附近,但其中一些发生在阀门下游,这是由于在阀门中产生并继续向下游延伸的诱导涡流湍流.这些涡流“浪费”了机械能,因为它们最终会消散为热量.而管道下游部分的流动最终会恢复到完全发展的状态.例如，在测量一些较小损失组件(例如弯管)中的较小损失时,位置2必须离下游相当远(数十个管道直径),以便充分考虑由于这些衰减涡流造成的额外不可逆损失.

当组件下游的管径发生变化时,小损失的确定就更加复杂了.然而,在所有情况下,它都是基于额外的不可逆机械能损失,如果不存在较小的损失分量,则该损失将不存在.为简单起见,您可以将小损失视为局部发生在小损失分量上,但请记住,该分量会影响下游几个管道直径的流量.顺便说一下,这就是为什么大多数流量计制造商建议在任何弯管或阀门下游至少10到20个管径处安装流量计的原因——这使得弯管或阀门产生的涡流在很大程度上消失,速度在进入流量计之前,配置文件已完全展开.(大多数流量计在流量计入口处使用完全开发的速度分布进行校准，当实际应用中也存在这种情况时，会产生最佳精度。）当入口直径等于出口直径时，a的损失系数也可以通过测量整个组件的压力损失并将其除以动态压力来确定组件，KL = ΔPL/(𝜌 V2)。当一个部件的损失系数可用时，该部件的水头损失由下式确定：

通常，损耗系数取决于组件的几何形状和雷诺数，就像摩擦系数一样。然而，通常假设它与雷诺数无关。这是一个合理的近似值，因为实际上大多数流动都具有大雷诺数，并且在大雷诺数下，损失系数（包括摩擦系数）往往与雷诺数无关。小损失也用等效长度 Lequiv 表示，定义为（图 8-37），其中 f 是摩擦系数，D 是包含组件的管道的直径。部件引起的水头损失相当于长度为Lequiv 的一段管道引起的水头损失。因此，组件对水头损失的贡献可以通过简单地将 Lequiv 添加到总管道长度来计算。两种方法都在实践中使用，但使用损失系数更常见。因此，我们在本书中也使用这种方法。一旦所有损失系数都可用，管道系统中的总水头损失由下式确定：

其中 i 代表具有恒定直径的每个管段，j 代表导致较小损失的每个组件。如果被分析的整个管道系统具有恒定的直径，则公式 8-59 简化为，

其中 V 是通过整个系统的平均流速（注意 V = 常数，因为 D = 常数）。表 8-4 中给出了入口、出口、弯曲、突然和逐渐的面积变化以及阀门的代表性损失系数 KL。这些值存在相当大的不确定性，因为损失系数通常随管道直径、表面粗糙度、雷诺数和设计细节而变化。例如，两个不同制造商生产的两个看似相同的阀门的损失系数可能相差 2 倍或更多。因此，在管道系统的最终设计中应参考特定制造商的数据，而不是依赖手册中的代表值。管道入口处的水头损失是几何形状的强函数。对于圆润的入口，它几乎可以忽略不计（对于 r/D > 0.2，KL = 0.03），但对于尖锐边缘的入口，增加到大约 0.50（图 8-38）。也就是说，当流体进入管道时，锋利的入口会导致一半的速度水头损失。这是因为流体不能轻易地进行 90° 急转弯，尤其是在高速时。结果，水流在拐角处分离，水流被收缩到管道中部形成的静脉收缩区域（图 8-39）。因此，锋利的入口就像一个流动的收缩。由于有效流动面积减少，静脉收缩区域的速度增加（压力降低），然后随着流动充满管道的整个横截面而降低。如果按照伯努利方程增加压力，损失可以忽略不计（速度头将简单地转换为压头）。然而，这种减速过程远非理想，剧烈混合和湍流涡流引起的粘性耗散将部分动能转化为摩擦热，流体温度略有上升就证明了这一点。最终结果是速度下降而没有太多压力恢复，入口损失是这种不可逆压降的量度。即使边缘的轻微倒圆也会导致 KL 的显着降低，如图 8-40 所示。当管道伸入储层时，损失系数急剧上升（大约 KL = 0.8），因为在这种情况下，边缘附近的一些流体被迫旋转 180°。潜管出口的损失系数通常在手册中列为 KL = 1。然而，更准确地说，KL 等于动能校正因子 𝛼attheexitofthepipe。虽然𝛼isindeedcloseto1 完全发展的湍流管流，它等于 2 完全发展- 操作层流管流。为了避免在分析层流管流时可能出现的错误，最好始终设置 KL = 𝛼atasubmergedpipeexit。在任何这样的出口处，无论是层流还是湍流，离开管道的流体在与储层流体混合时会失去所有动能，并且最终通过粘度的不可逆作用停止。无论出口的形状如何，这都是正确的（表 8-4 和图 8-41）。因此，将管道出口的锐边修圆没有任何好处。（继续） 管道系统通常涉及突然或逐渐膨胀或收缩的部分，以适应流速或特性（例如密度和速度）的变化。由于流动分离，在突然膨胀和收缩（或广角膨胀）的情况下，损失通常要大得多。通过结合质量、动量和能量平衡方程，突然膨胀情况下的损失系数近似为，

其中 Asmall 和 Alarge 分别是小管和大管的横截面积。请注意，当没有面积变化时 KL = 0（Asmall = Alarge），当管道排入水库时 KL = 𝛼（Alarge ≫ Asmall）。突然收缩不存在这种关系，这种情况下的 KL 值必须从图表或表格中读取（例如，表 8-4）。通过在小管道和大管道之间安装锥形渐变区域转换器（喷嘴和扩散器），可以显着减少由于膨胀和收缩造成的损失。表 8-4 给出了具有代表性的逐渐扩张和收缩案例的 KL 值。请注意，在水头损失计算中，小管道中的速度将用作公式 8-57 中的参考速度。由于流动分离，膨胀期间的损失通常远高于收缩期间的损失。管道系统还涉及在不改变直径的情况下改变方向，这种流动部分称为弯头或弯头。这些设备的损失是由于内侧的流动分离（就像汽车进入转弯过快时被甩出道路一样）以及由此产生的旋转二次流。通过使用圆弧（如 90° 弯头）而不是急转弯（如斜角弯头）使流体“轻松”转弯，可以最大限度地减少方向变化期间的损失（图 8-42）。但是当转弯空间有限时，可能需要使用急转弯（因此会损失系数）。在这种情况下，可以通过使用适当放置的导向叶片来帮助水流以有序的方式转向而不会被甩出路线，从而将损失降至最低。表 8-4 中给出了一些弯头和斜接弯头以及三通的损耗系数。这些系数不包括沿弯管的摩擦损失。此类损失应按直管计算（使用中心线长度作为管道长度）并添加到其他损失中。阀门通常用于管道系统，通过简单地改变水头损失来控制流速，直到达到所需的流速。对于阀门，理想的是在它们完全打开时具有非常低的损失系数，例如球阀，以便它们在全负荷运行期间产生最小的水头损失（图 8-43b）。几种不同的阀门设计，每一种都有自己的优点和缺点，今天普遍使用。闸阀像闸门一样上下滑动，截止阀（图8-43a）关闭放置在阀门上的孔，角阀是90°转弯的截止阀，止回阀允许流体流动只在一个方向上，就像电路中的二极管一样。表 8-4 列出了流行设计的代表性损耗系数。请注意，当阀门关闭时，损失系数会急剧增加。此外，由于阀门的复杂几何形状，不同制造商的损失系数偏差最大。

8-7 管道网络和泵选择

串联和并联管道

实践中遇到的大多数管道系统，例如城市或商业或住宅场所的配水系统，都涉及许多并联和串联连接以及多个来源（向系统中供应流体）和负载（从系统中排出流体） （图 8-45）。管道项目可能涉及新系统的设计或现有系统的扩展。此类项目的工程目标是设计一个管道系统，该系统能够以最低的总成本（初始加上运行和维护成本）在指定压力下可靠地提供指定流量。一旦准备好系统的布局，确定整个系统的管道直径和压力，同时保持在预算限制内，通常需要重复求解系统，直到达到最佳解决方案。此类系统的计算机建模和分析使这项繁琐的任务变得简单。管道系统通常涉及多个相互串联和/或并联连接的管道，如图 1 和图 1 所示。 8-46 和 8-47。当管道串联连接时，无论系统中各个管道的直径如何，通过整个系统的流量都保持恒定。这是稳定不可压缩流动的质量守恒原理的自然结果。在这种情况下，总水头损失等于系统中各个管道的水头损失总和，包括小损失。连接处的膨胀或收缩损失被认为属于小直径管道，因为膨胀和收缩损失系数是根据小直径管道中的平均速度定义的。对于分支为两个（或更多）平行管道然后在下游连接处重新连接的管道，总流量是各个管道中流量的总和。由于 ΔP = PA - PB 并且所有单独管道的连接压力 PA 和 PB 都相同，因此每个并联连接的单独管道中的压降（或水头损失）必须相同。对于在连接点 A 和 B 之间具有可忽略的微小损失的两条平行管道 1 和 2 的系统，这表示为，

那么两条平行管道中的平均速度与流量之比变为，

因此，平行管道中的相对流量是根据每个管道中的水头损失相同的要求建立的。这个结果可以扩展到任意数量的并联管道。如果将导致较小损失的组件的等效长度添加到管道长度中，则该结果也适用于较小损失较大的管道​​。请注意，其中一个平行支路中的流速与其直径的 5/2 次方成正比，并与其长度和摩擦系数的平方根成反比。管网的分析，无论多么复杂，都基于两个简单的原则： 必须满足整个系统的质量守恒。这是通过要求流入一个结点的总流量等于系统中所有结点流出该结点的总流量来实现的。此外，无论直径如何变化，串联连接的管道中的流速都必须保持恒定。两个连接点之间的压降（以及水头损失）对于两个连接点之间的所有路径必须相同。这是因为压力是一个点函数，在指定点上不能有两个值。在实践中，此规则用于要求循环中水头损失的代数和（对于所有循环）为零。 （水头损失取顺时针方向为正，逆时针方向为负。）因此，管网分析与电路分析（基尔霍夫定律）非常相似，流量对应对应于电势的电流和压力。然而，这里的情况要复杂得多，因为与电阻不同，“流动阻力”是一个高度非线性的函数。因此，管网分析需要对非线性方程组进行联立求解，这需要EES、Excel、Mathcad、Matlab等软件，或专门为此类应用设计的市售软件。

带泵和涡轮机的管道系统

当管道系统涉及泵和/或涡轮机时，单位质量基础上的稳流能量方程表示为（参见第 5-6 节），

或就头部而言，

其中 hpump, u = wpump, u/g 是输送到流体中的有用泵头，hturbine，e = wturbine，e/g 是从流体中提取的涡轮头，𝛼是动能修正系数，其值对于大多数情况约为 1.05（湍流）在实践中遇到的流动，hL 是点 1 和点 2 之间管道中的总水头损失（如果它们很重要，则包括较小的损失）。如果管道系统不涉及泵或风扇，则泵头为零，如果系统不涉及涡轮机，涡轮机头为零，如果系统不涉及任何机械功产生或功消耗装置，则两者都为零。许多实际的管道系统都涉及将流体从一个储液器输送到另一个储液器的泵。取点 1 和 2 位于水库的自由表面（图 8-48），求解所需的有用泵头的能量方程，产生，

因为对于大型储层，自由表面的速度可以忽略不计，并且压力处于大气压。因此，有用的泵头等于两个水库之间的高程差加上水头损失。如果与 z2 - z1 相比，水头损失可以忽略不计，则有用的泵头等于两个水库之间的高程差。在没有泵的情况下 z1 > z2（第一个水库的海拔高于第二个水库），水流由重力驱动，流速导致水头损失等于海拔差。通过将公式 8-64 中的 hpump, u 替换为 -hturbine, e，可以为水力发电厂的涡轮机压头给出类似的论证。一旦知道有用的泵头，泵需要向流体输送的机械功率和泵电机在特定流量下消耗的电能由以下公式确定：

其中𝜂泵-电机是泵-电机组合的效率，它是泵和电机效率的乘积（图 8-49）。泵电机效率定义为泵输送给流体的净机械能与泵电机消耗的电能之比，通常在 50% 到 85% 之间。管道系统的水头损失随流速增加（通常呈二次方）。所需的有用泵头 hpump 的图，u 作为流量的函数称为系统（或需求）曲线。泵产生的扬程也不是常数。泵头和泵效率都随流速而变化，泵制造商以表格或图形形式提供这种变化，如图 8-50 所示。这些实验确定的 hpump, u 和 𝜂pump, u 与 .曲线称为特性（或供给或性能）曲线。请注意，泵的流量随着所需扬程的降低而增加。泵扬程曲线与纵轴的交点通常表示泵可以提供的最大扬程（称为截流扬程），而与横轴的交点表示泵的最大流量（称为自由输送）可以供应。泵的效率在扬程和流量的特定组合下最高。因此，除非泵在这些条件下的效率足够高，否则能够提供所需扬程和流量的泵不一定是管道系统的好选择。安装在管道系统中的泵将在系统曲线和特性曲线的交点处运行。这个交点称为工作点，如图 8-47 所示。此时泵产生的有用扬程与该流速下系统的扬程要求相匹配。此外，泵在运行期间的效率是与该流量相对应的值。

8-8 流量和速度测量

流体力学的一个主要应用领域是确定流体的流速，多年来已经开发了许多用于流量计量的设备。流量计在其复杂程度、尺寸、成本、精度、多功能性、容量、压降和工作原理方面范围广泛。我们概述了通常用于测量流经管道或管道的液体和气体流量的仪表。我们将考虑限制在不可压缩的流动上。一些流量计通过连续排放和再填充已知体积的测量室并跟踪每单位时间的排放次数来直接测量流量。但大多数流量计间接测量流量——它们测量平均速度 V 或与平均速度相关的量，如压力和阻力，并根据以下条件确定体积流量 V，

其中 Ac 是流动的横截面积。因此，测量流量通常是通过测量流速来完成的，而很多流量计只是简单的速度计，用于计量流量。管道中的速度从壁面的零到中心的最大值变化，在进行速度测量时记住这一点很重要。例如，对于层流，平均速度是中心线速度的一半。但在湍流中情况并非如此，可能需要取加权平均或多次局部速度测量的积分来确定平均速度。流量测量技术范围从非常粗糙到非常优雅。例如，通过花园软管的水流量可以简单地通过将水收集到已知体积的桶中并将收集的水量除以收集时间来测量（图 8-55）。估算河流流速的一种粗略方法是将浮标放在河流上并测量两个指定位置之间的漂流时间。在另一个极端，一些流量计使用声音在流动流体中的传播，而其他流量计使用流体通过磁场时产生的电动势。在本节中，我们将从第 5 章介绍的皮托管静压探头开始讨论通常用于测量速度和流量的设备。

皮托管和皮托管静态探头

以法国工程师 Henri de Pitot（1695-1771）的名字命名的皮托管（也称为皮托管）和静压探头被广泛用于流速测量。皮托管只是一根管子，在驻点处有一个测压口，用于测量停滞压力，而皮托管-静压探头既有一个驻点测压口，也有几个圆周静压测压口，它可以测量停滞压力和静压（图 8） –56 和 8–57）。皮托管是第一个用上游尖管测量速度的人，而法国工程师亨利达西 (1803-1858) 开发了我们今天使用的仪器的大部分功能，包括使用小开口和将静态管放置在同一个程序集。因此，将 Pitot-static 探针称为 Pitot-Darcy 探针更为合适。 Pitot-static 探头通过测量压力差并结合伯努利方程来测量局部速度。它由一根细长的双管组成，与流量对齐并连接到差压计。内管完全打开以在鼻子处流动，因此它测量该位置的停滞压力（点 1）。外管在鼻端密封，但在外壁一侧（点 2）有孔，因此它测量静压。对于具有足够高速度的不可压缩流动（使得点 1 和 2 之间的摩擦效应可以忽略不计），伯努利方程适用并表示为，

注意到 z1≅z2 因为皮托静压探头的静压孔是围绕管周向排列的，并且由于停滞条件 V1 = 0，所以流速 V = V2 变为，

这被称为皮托管公式。请注意，此速度是理论上的，在高雷诺数时效果最佳；实际速度比这个小一点，一些实验者乘以速度系数 CV，范围在 0.970 到 0.999 之间，随着雷诺数的增加而增加。如果在局部速度等于平均流速的位置测量速度，则可以从 确定体积流量。 = 伏安。皮托管静压探头是一种简单、廉价且高度可靠的设备，因为它没有移动部件（图 8-58）。它还导致非常小的压降并且通常不会明显扰乱流动。然而，重要的是它与流量正确对齐（通常在 ± 10o 以内）以避免可能由未对齐引起的重大错误。此外，静压和滞压之差（即动压）与流体密度和流速的平方成正比。它用于测量液体和气体的速度。注意到气体密度低，当皮托静压探头用于气体流动时，流速应该足够高，从而产生可测量的动态压力。

阻塞流量计：孔板流量计、文丘里流量计和喷嘴流量计

考虑不可压缩的流体在直径为 D 的水平管道中的稳定流动，该管道被限制为直径为 d 的流动区域，如图 8-59 所示。收缩前的位置（点 1）和发生收缩的位置（点 2）之间的质量平衡和伯努利方程写为，

结合方程 8-69 和 8-70 并求解速度 V2 给出，

其中 𝛽 =d/D 是直径比。一旦知道 V2，就可以从 确定流速。 = A2V2 = (𝜋d2/4)V2。这个简单的分析表明通过管道的流速可以通过收缩流量和测量由于收缩部位速度增加而导致的压力下降来确定。注意到沿流动的两点之间的压降很容易通过差压传感器或压力计测量，似乎可以通过阻碍流动来构建简单的流量测量装置。基于此原理的流量计称为阻塞流量计，广泛用于测量气体和液体的流量。公式 8-71 中的速度是通过假设没有损失获得的，因此它是在收缩部位可能出现的最大速度。实际上，由于摩擦效应造成的一些压力损失是不可避免的，因此实际速度较小。此外，流体流继续收缩越过障碍物，并且静脉收缩面积小于障碍物的流动面积。这两种损失都可以通过引入一个称为流量系数 Cd 的校正因子来计算，其值（小于 1）是通过实验确定的。那么阻塞流量计的流量表示为，

其中 A0 = A2 = 𝜋d2/4 是喉部或孔口的横截面积，𝛽 =d/D 是喉部直径与管道直径的比值。 Cd 的值取决于 𝛽 和雷诺数 Re=V1D/𝜈 ，并且 Cd 的图表和曲线拟合相关性可用于各种类型的障碍仪表。请注意，Cd 实际上是速度系数 CV 和收缩系数 CC 的乘积，即 Cd = CVCC，但通常制造商文献中仅列出 Cd。在众多类型的阻塞流量计中，应用最广泛的是孔板流量计、流量喷嘴和文丘里流量计（图 8-60）。对于标准化几何形状，流量系数的实验确定数据表示为 (Miller, 1997)，

这些关系适用于 0.25 < 𝛽 <0.75 和 104 < Re < 107。 Cd 的精确值取决于障碍物的特定设计，因此应在可用时查阅制造商的数据。此外，雷诺数取决于流速，这是先验未知的。因此，当曲线拟合相关性用于 Cd 时，该解决方案本质上是迭代的。对于具有高雷诺数 (Re > 30,000) 的流动，Cd 值可以取为流喷嘴的 0.96 和孔口的 0.61。由于其流线型设计，文丘里流量计的流量系数非常高，大多数流量的范围在 0.95 和 0.99 之间（较高的值代表较高的雷诺数）。在没有具体数据的情况下，我们可以对文丘里计取 Cd = 0.98。孔板流量计设计最简单，占用空间最小，因为它由一个中间有孔的板组成，但设计上有相当大的变化（图 8-61）。一些孔板流量计是锋利的边缘，而另一些则是斜面或圆形的。孔板流量计中流动面积的突然变化会引起相当大的涡流，从而导致显着的水头损失或永久压力损失，如图 8-62 所示。在喷嘴流量计中，板被喷嘴代替，因此喷嘴中的流动是流线型的。结果，实际上消除了静脉收缩并且水头损失更小。然而，流量喷嘴流量计比孔板流量计贵。文丘里流量计由美国工程师 Clemens Her-schel (1842–1930) 发明并以意大利人 Giovanni Venturi (1746–1822) 的名字命名，以表彰他在锥形流截面方面的开创性工作，是该组中最准确的流量计，但它也是最贵的。它的逐渐收缩和膨胀防止了流动分离和漩涡，并且它仅在内壁表面上遭受摩擦损失。文丘里流量计造成的水头损失非常低，因此，它们应该优先用于不允许大压降的应用。当阻塞流量计放置在管道系统中时，它对流量系统的净影响就像是一个微小的损失。流量计的小损失系数可从制造商处获得，在对系统中的小损失求和时应包括在内。一般来说，孔板流量计的次要损耗系数最高，而文丘里流量计的最低。请注意，由于测压口的位置不同，为计算流量而测量的压降 P1 - P2 与阻塞流量计造成的总压力损失不同。 请注意压降和压力损失之间的区别（图 8-62）。 压降是由于势能和动能之间的转换造成的，并且是可以恢复的。 然而，压力损失是由不可逆转的损失引起的，并且无法恢复。 最后，障碍流量计也用于测量可压缩气体的流速，但必须在公式 8-72 中插入额外的校正因子以考虑可压缩性影响。 在这种情况下，方程是为质量流量而不是体积流量编写的，可压缩校正因子通常是一个经验曲线拟合方程（如 Cd 的方程），可从流量计制造商处获得。

容积式流量计

当我们为我们的汽车购买汽油时，我们感兴趣的是我们加满油箱期间流经喷嘴的汽油总量，而不是汽油的流速。同样，我们关心在计费期间我们在家中使用的水或天然气的总量。在这些和许多其他应用中，感兴趣的量是在一定时间段内通过管道横截面的流体的质量或体积总量，而不是流量的瞬时值，容积式流量计非常适合此类应用。位移计的种类很多，它们都是基于测量室的连续填充和排放。它们的工作方式是收集一定量的流入流体，将其排到仪表的排放侧，并计算此类排放-补给循环的次数，以确定排放的流体总量。图 8-64 显示了一个容积式流量计，带有两个由流动液体驱动的旋转叶轮。每个叶轮都有三个齿轮瓣，每次一个叶轮经过一个非侵入式传感器时都会产生一个脉冲输出信号。每个脉冲代表在叶轮叶之间捕获的已知液体体积，电子控制器将脉冲转换为体积单位。必须仔细控制叶轮与其外壳之间的间隙，以防止泄漏，从而避免错误。这种特殊仪表的报价精度为 0.1%，压降低，可用于温度高达 230°C 和压力高达 7 MPa 的高粘度或低粘度液体，流速高达700 加仑/分钟（或 50 升/秒）。测量液体体积最广泛使用的流量计是章动盘流量计，如图 8-65 所示。它们通常用作水表和汽油表。液体通过腔室 (A) 进入章动盘流量计。这会导致磁盘 (B) 章动或摆动，并导致主轴 (C) 旋转和磁铁 (D) 励磁。该信号通过仪表外壳传输到第二个磁铁 (E)。通过在放电过程中对这些信号的数量进行计数来获得总体积。气体流量，例如建筑物中使用的天然气量，通常通过使用波纹管流量计来计量，该流量计在每次旋转期间置换一定量的气体体积（或质量）。

涡轮流量计

我们从经验中都知道，螺旋桨逆风旋转，随着风速的增加，旋转速度也随之增加。您可能还看到，风力涡轮机的涡轮叶片在低风时旋转得相当慢，但在大风时旋转得非常快。这些观察结果表明，可以通过在管段内放置一个自由旋转的螺旋桨并进行必要的校准来测量管道中的流速。基于此原理工作的流量测量设备称为涡轮流量计或有时称为螺旋桨流量计，尽管后者用词不当，因为根据定义，螺旋桨为流体增加能量，而涡轮机从流体中提取能量。涡轮流量计由一个圆柱形流动部分组成，该流动部分装有一个可自由旋转的涡轮机（带叶片的转子），入口处的附加静叶用于使流量变直，以及一个传感器，每次到达涡轮上的标记点时都会产生一个脉冲经过以确定旋转速度。涡轮机的转速几乎与流体的流速成正比。当针对预期的流量条件进行适当校准时，涡轮流量计可在很宽的流速范围内提供高度准确的结果（精确到 0.25%）。涡轮流量计用于测量液体流量时叶片很少（有时只有两个叶片），但用于测量气体流量时有几个叶片以确保产生足够的扭矩。涡轮造成的水头损失很小。自 1940 年代以来，涡轮流量计已被广泛用于流量测量，因为它们简单、成本低且在各种流量条件下都具有准确性。它们可用于液体和气体以及几乎所有尺寸的管道。涡轮流量计也常用于测量无侧限流动（如风、河流和洋流）中的流速。图 8-66c 中所示的手持设备用于测量风速。在不需要非常高的精度的流量中，叶轮流量计是涡轮流量计的低成本替代品。在叶轮流量计中，叶轮（转子和叶片）垂直于流动，如图 8-67 所示，而不是像涡轮流量计那样平行。桨叶仅覆盖流动横截面的一部分（通常不到一半），因此与涡轮流量计相比，水头损失较小，但叶轮插入流体中的深度对于精度至关重要。此外，由于桨叶轮不易结垢，因此不需要过滤器。传感器检测每个桨轮叶片的通过并发送信号。然后微处理器将此转速信息转换为流量或积分流量。

变截面流量计（转子流量计）

可变面积流量计是一种简单、可靠、廉价且易于安装的流量计，具有相当低的压降，无需电气连接，可直接读取各种液体和气体的流速，也称为转子流量计或浮子流量计。变截面流量计由一根由玻璃或塑料制成的垂直锥形透明管组成，内部有一个可自由移动的浮子，如图 8-68 所示。当流体流过锥形管时，浮子在管内上升到浮子重量、拖曳力和浮力相互平衡且作用在浮子上的合力为零的位置。流量是通过简单地将浮子的位置与锥形透明管外的渐变流量刻度相匹配来确定的。浮子本身通常是一个球体或一个松配合的活塞状圆柱体（如图 8-68a 所示）。我们从经验中知道，大风会吹倒树木、破坏电线、吹走帽子或雨伞。这是因为阻力随着流速的增加而增加。作用在浮子上的重量和浮力是恒定的，但阻力随流速而变化。此外，由于横截面积的增加，沿锥形管的速度在流动方向上降低。有一定的速度会产生足够的阻力来平衡浮子的重量和浮力，这个速度在浮子周围发生的位置就是浮子安定的位置。管子的锥度可以使得垂直上升随流速线性变化，因此管子可以线性地校准流速。透明管还允许在流动过程中看到流体。有几种变截面流量计。重力流量计，如图 8-68a 所示，必须垂直放置，流体从底部进入，从顶部流出。在弹簧对置流量计（图 8-68b）中，阻力由弹簧力平衡，这种流量计可以水平安装。变截面流量计的精度通常为±5%。因此，这些流量计不适用于需要精确测量的应用。然而，一些制造商报价的准确度约为 1%。此外，这些仪表依赖于对浮子位置的目视检查，因此它们不能用于测量不透明或肮脏的流体的流速，或者覆盖浮子的流体，因为这些流体阻碍了视觉访问。最后，玻璃管容易破裂，因此如果处理有毒流体，它们会构成安全隐患。在此类应用中，可变面积流量计应安装在流量最少的位置。

超声波流量计

人们普遍观察到，当一块石头掉入平静的水中时，所产生的波浪会以同心圆的形式均匀地向各个方向扩散。但是，当将一块石头扔进河流等流动的水中时，与沿上游方向移动的波浪相比，波浪在流动方向上的移动速度要快得多（波浪和流速相加，因为它们的方向相同） （波浪和流速被减去，因为它们的方向相反）。结果，波浪看起来在下游扩散，而在上游看起来紧密堆积。每单位长度流动的上游和下游部分的波浪数量之间的差异与流速成正比，这表明可以通过比较波浪在向前和向后方向上的传播相对于流速来测量流速。流量。超声波流量计基于此原理工作，使用超声波范围内的声波（超出人类听觉能力，通常频率为 1 MHz）。超声波（或声学）流量计的工作原理是用换能器产生声波并测量这些声波在流动流体中的传播。超声波流量计有两种基本类型：传输时间流量计和多普勒效应（或频移）流量计。传播时间流量计在上游和下游方向传输声波并测量传播时间的差异。图 8-69 示意性地显示了一个典型的传输时间超声波仪。它涉及两个交替发射和接收超声波的换能器，一个沿流动方向，另一个沿相反方向。可以精确测量每个方向的旅行时间，并计算旅行时间的差异。管道中的平均流速 V 与该行程时间差 Δt 成正比，并由此确定，其中 L 是传感器之间的距离，K 是常数。您可能已经注意到，当一辆快速移动的汽车以其喇叭吹响，喇叭高亢的声音随着汽车驶过而降到较低的音调。这是由于声波在汽车前面被压缩并在它后面传播。这种频率变化称为多普勒效应，它构成了大多数超声波流量计工作的基础。多普勒效应超声波流量计测量沿声波路径的平均流速。这是通过将压电换能器夹在管道的外表面上（或将换能器压在手持装置的管道上）来完成的。换能器将固定频率的声波通过管壁传输到流动的液体中。被悬浮的固体颗粒或夹带的气泡等杂质反射的波被中继到接收换能器。反射波频率的变化与流速成正比，微处理器通过比较传输和反射信号之间的频移来确定流速（图 8-70 和 8-71）。通过为给定的管道和流量条件正确配置流量计，也可以使用测得的速度来确定流量和总流量。超声波流量计的操作取决于超声波被密度不连续性反射。普通超声波流量计要求液体含有浓度大于百万分之 25 (ppm) 且尺寸至少大于 30 μm 的杂质。但是先进的超声波装置也可以通过感应从流动流中的湍流漩涡和涡流反射的波来测量清洁液体的速度，前提是它们安装在此类扰动不对称且高度高的位置，例如流动部分就在 90° 弯头的下游。超声波流量计具有以下优点： 通过将它们夹在直径为 0.6 cm 到 3 m 以上的管道外侧（图 8-71），甚至在明渠上，它们安装起来方便快捷。它们是非侵入式的。由于仪表夹紧，无需停止操作和在管道上钻孔，也无需停产。仪表不会干扰流量，因此不会产生压降。由于与流体没有直接接触，因此有没有腐蚀或堵塞的危险。它们适用于从有毒化学品到泥浆再到清洁液体的各种流体，用于永久或临时流量测量。没有活动部件，因此仪表提供可靠且免维护的操作。它们还可以测量逆流中的流量。引用的精度为 1% 到 2%。 超声波流量计是无创设备，超声波换能器可以有效地通过聚氯乙烯（PVC）、钢、铁和玻璃管壁传输信号。 然而，涂层管道和混凝土管道不适合这种测量技术，因为它们会吸收超声波。

电磁流量计

自 1830 年代法拉第的实验以来就已经知道，当导体在磁场中移动时，由于磁感应，在该导体上会产生电动势。法拉第定律指出，当任何导体在磁场中以直角移动时，其感应电压与该导体的速度成正比。这表明我们可以通过用导电流体代替固体导体来确定流速，而电磁流量计正是这样做的。电磁流量计从 1950 年代中期开始使用，它们有各种设计，例如全流量和插入式。全流量电磁流量计是一种非侵入式装置，它由环绕管道的磁线圈和沿与管道内表面齐平的直径钻入管道中的两个电极组成，使电极与管道接触。流体，但不会干扰流动，因此不会导致任何水头损失（图 8-72a）。电极连接到电压表。线圈在通电时产生磁场，电压表测量电极之间的电势差。该电位差与导电流体的流速成正比，因此可以通过将其与产生的电压相关联来计算流速。插入式电磁流量计的工作原理类似，但磁场被限制在插入流中的杆尖端的流道内，如图 8-72b 所示。电磁流量计非常适合测量某些核反应堆中使用的液态金属（例如汞、钠和钾）的流速。它们也可用于不良导体的液体，例如水，前提是它们含有足够数量的带电粒子。例如，血液和海水中含有足够量的离子，因此可以使用电磁流量计来测量它们的流速。电磁流量计还可用于测量化学品、药品、化妆品、腐蚀性液体、饮料、化肥以及大量泥浆和污泥的流量，前提是这些物质具有足够高的电导率。电磁流量计不适用于蒸馏水或去离子水。电磁流量计间接测量流速，因此在安装过程中仔细校准很重要。它们的使用受限于它们相对较高的成本、功耗以及对它们可以使用的合适流体类型的限制。

涡街流量计

您可能已经注意到，当河流（例如河流）遇到障碍物（例如岩石）时，流体会分离并在岩石周围移动。但是通过它产生的漩涡，在下游的一段距离内可以感觉到岩石的存在。实践中遇到的大多数流动都是湍流，放置在流动中的圆盘或短圆柱会产生涡流（另见第 4 章）。观察到这些涡流周期性地脱落，并且脱落频率与平均流速成正比。这表明可以通过在流动中放置障碍物并测量脱落频率在流动中产生涡流来确定流速。以此原理工作的流量测量设备称为涡街流量计。 Strouhal 数，定义为 St = fd/V，其中 f 是涡旋脱落频率，d 是障碍物的特征直径或宽度，V 是撞击障碍物的流动速度，在在这种情况下，只要流速足够高。涡街流量计由一个锋利的钝体（支柱）组成，它放置在作为涡流发生器的流动中，以及一个检测器（例如记录压力振荡的压力传感器）放置在内表面下游一小段距离测量脱落频率。检测器可以是超声波、电子或光纤传感器，用于监测涡流模式的变化并传输脉动输出信号（图 8-73）。然后微处理器使用频率信息来计算和显示流速或流速。涡街脱落的频率与雷诺数很宽的范围内的平均速度成正比，涡街流量计在 104 到 107 的雷诺数下可靠准确地运行。涡街流量计的优点是它没有运动部件，因此具有固有的特性可靠、通用且非常准确（在很宽的流速范围内通常为 ±1%），但它会阻碍流动，从而导致相当大的水头损失。

热（热线和热膜）风速计

热风速计于 1950 年代后期推出，此后一直在流体研究设施和实验室中普遍使用。顾名思义，热风速计包括一个电加热传感器，如图 8-74 所示，并利用热效应来测量流速。热式风速计具有非常小的传感器，因此它们可用于测量流动中任何点的瞬时速度，而不会明显干扰流动。它们每秒可以进行数千次速度测量，具有出色的空间和时间分辨率，因此它们可用于研究湍流波动的细节。它们可以在很宽的范围内准确测量液体和气体的速度——从每秒几厘米到超过一百米。如果传感元件是电线，则热式风速计被称为热线风速计，如果传感器是金属薄膜（厚度小于 0.1 μm），则称为热膜风速计，通常安装在具有直径的相对较厚的陶瓷支架上约 50 微米。热线式风速计的特点是传感器线非常细——直径通常只有几微米，长度只有几毫米。传感器通常由铂、钨或铂铱合金制成，并通过针状支架连接到探头上。热线风速计的细线传感器由于尺寸小而非常脆弱，如果液体或气体含有过多的污染物或颗粒物，则很容易损坏。这在高速下尤其重要。在这种情况下，应使用更坚固的热膜探头。但热膜探头的传感器体积较大，频率响应明显较低，对流量的干扰较大；因此它并不总是适合研究湍流的细节。恒温风速计 (CTA) 是最常见的类型，如图 8-75 所示，其工作原理如下：传感器被电加热到指定温度（通常约为 200°C ）。传感器在向周围流动的流体散热时趋于冷却，但电子控制通过根据需要改变电流（通过改变电压来实现）将传感器保持在恒定温度。流速越高，传感器的传热速率就越高，因此需要在传感器上施加的电压就越大，以使其保持恒定温度。流速与电压密切相关，流速是通过测量放大器施加的电压或通过传感器的电流来确定的。传感器在运行期间保持恒定温度，因此其热能含量保持恒定。能量守恒原理要求传感器的电焦耳热 W.elect = I2Rw = E2/Rw 必须等于传感器的总热损失率 Q.total，其中包括自传导以来的对流热传递线支架和周围表面的辐射很小，可以忽略不计。使用强制对流的适当关系，能量平衡由金定律表示为，其中 E 是电压，常数 a、b 和 n 的值针对给定的探头进行校准。一旦测量了电压，这个关系就直接给出了流速 V。大多数热线传感器直径为 5 µm，长度约为 1 mm，由钨制成。导线点焊到嵌入探头主体中的针状插脚上，探头主体连接到风速计电子设备。通过分别使用带有两个或三个传感器的探头，热风速计可用于同时测量二维或三维速度分量（图 8-76）。选择探头时，应考虑流体的类型和污染程度、要测量的速度分量的数量、所需的空间和时间分辨率以及测量位置。

激光多普勒测速仪

激光多普勒测速 (LDV)，也称为激光测速 (LV) 或激光多普勒测速 (LDA)，是一种光学技术，可在不干扰流动的情况下测量任何所需点的流速。与热风速测量不同，LDV 不涉及插入流中的探针或电线，因此它是一种非侵入式方法。与热风速仪一样，它可以在很小的体积内准确测量速度，因此也可以用于研究局部流动的细节，包括湍流波动，并且可以穿越整个流场而不受干扰. LDV 技术是在 1960 年代中期开发的，并且由于它为气体和液体流动提供的高精度而被广泛接受。它提供的高空间分辨率；并且，近年来，它能够测量所有三个速度分量。它的缺点是成本相对较高；要求激光源、流中的目标位置和光电探测器之间有足够的透明度；以及仔细对准发射和反射光束以确保准确性的要求。对于光纤 LDV 系统，后一个缺点消除了，因为它在工厂进行了校准。 LDV 的工作原理是基于向目标发送高度相干的单色（所有波同相且波长相同）光束，收集目标区域内小颗粒反射的光，确定目标频率的变化。由于多普勒效应引起的反射辐射，并将此频移与目标区域的流体流速相关联。 LDV 系统有许多不同的配置。用于测量单个速度分量的基本双光束 LDV 系统如图 8-77 所示。所有 LDV 系统的核心是激光电源，通常是氦氖或氩离子激光器，功率输出为 10 mW 至 20 W。 激光比其他光源更受欢迎，因为激光束具有高度的相干性和高度集中。例如，氦氖激光器发射波长为 0.6328 μm 的辐射，处于红橙色范围内。激光束首先被称为分束器的半镀银镜分成强度相等的两束平行光束。然后两束光束通过一个会聚透镜，该透镜将光束聚焦在流中的一个点（目标）。两束相交处的小流体体积是测量速度的区域，称为测量体积或焦点体积。测量体积类似于椭圆体，通常直径为 0.1 毫米，长度为 0.5 毫米。激光被穿过该测量体积的粒子散射，向特定方向散射的光被接收透镜收集并通过光电探测器，该光电探测器将光强的波动转换为电压信号的波动。最后，信号处理器确定电压信号的频率，从而确定流速。图 8-78 中示意性地显示了在测量体积中交叉的两束激光束的波。两束光束的波在测量体积中发生干涉，在它们同相处产生亮条纹并因此相互支撑，并在它们异相处产生暗条纹从而相互抵消。亮暗条纹在两束入射激光束之间形成平行于中平面的线条。使用三角学，条纹线之间的间距 s 可以看作是条纹的波长，可以表示为 s = 𝜆/[2sin(𝛼/2)]，其中𝜆 是激光束的波长，𝛼是两束激光束之间的夹角。当粒子以速度 V 穿过这些条纹线时，散射条纹线的频率为，

这种基本关系表明流速与频率成正比，称为 LDV 方程。当粒子通过测量体积时，由于条纹图案，反射光先亮，然后暗，然后亮等，通过测量反射光的频率来确定流速。例如，管道横截面的速度分布可以通过绘制穿过管道的流量来获得（图 8-79）。 LDV 方法显然取决于散射条纹线的存在，因此流动必须包含足够数量的称为种子或种子粒子的小粒子。这些粒子必须足够小以紧密跟随流动，以便粒子速度等于流动速度，但足够大（相对于激光的波长）以散射足够量的光。直径为 1 μm 的颗粒通常可以很好地达到目的。一些流体（如自来水）自然含有足够数量的此类颗粒，无需接种。气体（例如空气）通常带有烟雾或由乳胶、油或其他材料制成的颗粒。 通过使用不同波长的三个激光束对，LDV 系统还可用于获得流动中任意点的所有三个速度分量。

粒子图像测速

粒子图像测速 (PIV) 是一种双脉冲激光技术，用于通过在很短的时间间隔内通过照相确定平面中粒子的位移来测量流动平面中的瞬时速度分布。与热线风速测量法和 LDV 等测量点速度的方法不同，PIV 在整个横截面上同时提供速度值，因此它是一种全场技术。 PIV 将 LDV 的准确性与流动可视化的能力相结合，并提供瞬时流场映射。例如，可以通过单个 PIV 测量获得管道横截面的整个瞬时速度分布。 PIV 系统可以被视为一个相机，它可以在流动的任何所需平面上拍摄速度分布的快照。普通流可视化给出了流细节的定性图片。 PIV 还提供对各种流量（例如速度场）的准确定量描述，从而能够使用所提供的速度数据对流量进行数值分析。由于其全场能力，PIV 还用于验证计算流体动力学 (CFD) 代码（第 15 章）。 PIV 技术自 1980 年代中期开始使用，近年来随着图像采集卡和电荷耦合器件 (CCD) 相机技术的改进，其用途和功能得到了发展。 PIV 系统的准确性、灵活性和多功能性及其在亚微秒曝光时间内捕获全场图像的能力，使其成为研究超音速流动、爆炸、火焰传播、气泡生长和坍塌的极其有价值的工具，湍流和不稳定的流动。用于速度测量的 PIV 技术包括两个主要步骤：可视化和图像处理。第一步是用合适的粒子加速流动，以追踪流体运动。然后，激光片脉冲照射所需平面上的流场薄片，通过检测粒子在与平面成直角放置的数字视频或摄影机上的散射光来确定粒子在该平面中的位置。光片（图 8-80）。在很短的时间段 Δt（通常以 μs 为单位）之后，粒子再次被激光片的第二个脉冲照射，并记录它们的新位置。使用这两个叠加相机图像的信息，确定所有粒子的粒子位移Δs，并根据Δs/Δt确定每个粒子在激光片平面内的速度大小。粒子的运动方向也由这两个位置确定，从而计算出平面中的两个速度分量。 PIV 系统的内置算法确定整个平面上数百或数千个称为询问区域的区域元素的速度，并以任何所需的形式在计算机监视器上显示速度场（图 8-81）。 PIV 技术依赖于由粒子散射的激光，因此如果需要，必须用粒子（也称为标记）为流注入种子，以获得足够的反射信号。种子粒子必须能够遵循流动中的路径，它们的运动才能代表流动，这要求粒子密度等于流体密度（以便它们具有中性浮力）或粒子如此之小（通常为 μm 大小）表明它们相对于流体的运动是微不足道的。多种此类颗粒可用于种子气体或液体流。在高速流动中必须使用非常小的颗粒。碳化硅颗粒（平均直径 1.5 μm）适用于液体和气体流动，二氧化钛颗粒（平均直径 0.2 μm）通常用于气体流动并适用于高温应用，聚苯乙烯乳胶颗粒（标称值）直径为 1.0 μm）适用于低温应用。金属涂层颗粒（平均直径为 9.0 μm）由于其高反射率也用于 LDV 测量的水流种子。气泡以及一些液体如橄榄油或硅油的液滴在雾化成微米大小的球体后也用作种子颗粒。 PIV 系统可以使用各种激光光源，例如氩气、铜蒸汽和 Nd:YAG，具体取决于对脉冲持续时间、功率和脉冲之间的时间的要求。 Nd:YAG 激光器通常用于 PIV 系统的广泛应用。光束传输系统如光臂或光纤系统用于产生和传输指定厚度的高能脉冲激光片。使用 PIV，还可以获得涡度和应变率等其他流动特性，并且可以研究湍流的细节。 PIV 技术的最新进展使得使用两台相机获得流体横截面的三维速度剖面成为可能（图 8-82）。 这是通过两个相机在不同角度同时记录目标平面的图像来完成的，处理信息以产生两个单独的二维速度图，并将这两个图结合起来生成瞬时三维速度场 .

生物流体力学导论

生物流体力学可以涵盖人体的许多生理系统，但该术语也适用于所有动物物种，因为有许多基本的流体系统，它们本质上是一系列用于输送流体（液体或气体或也许两者都有）。如果我们关注人类，这些流体系统是心血管、呼吸、淋巴、眼部和胃肠道等等。我们应该记住，所有这些系统都类似于其他机械管道网络，因为网络的基本组成部分包括泵、管道、阀门和流体。出于我们的目的，我们将更多地关注心血管系统，以展示人体管道网络的基本概念。图 8-83 说明了心血管系统，更具体地说，是将血液（流体）从心脏（特别是左心室（泵））输送到身体其他部位的全身循环或血管（管道）。请记住，从右心室到肺部有一个单独的血管网络，可以再次为血液充氧。系统循环中一系列管道的独特之处在于其几何形状或横截面不是圆形而是椭圆形，事实上，与管道网络的典型机械系统不同，管道网络具有从一种尺寸的管道过渡到另一种尺寸的管件从主动脉（左心室的第一个血管）开始，心血管系统在毛细血管水平从直径约 25 毫米逐渐变细到直径为 5 微米，然后逐渐增加到直径约 25 毫米。腔静脉，这是连接到右心室的血管。循环（尤其是血管）的另一个重要元素是它们具有顺应性，可以根据需要扩张以适应血容量，从而调节压力变化以维持体内平衡。心血管系统是一个复杂的管道网络，它们本身就存在并对压力做出反应，就像血液元素在规范改变时做出反应一样。即使有了这个网络，该系统也更加复杂，因为血流根据从心脏发出的脉冲不断移动，以驱动血液通过网络。这种脉动通过血液和血管壁传播，在系统内产生波和反射的相互作用。由于与分支、分叉和曲率相关的不连续性，如图 8-83 所示，初始和边界条件并不简单。鉴于血管网络和组件本身的复杂性，了解血流是一项具有挑战性的工作。 PIV 和 LDV 等流量测量技术在表征医疗设备内部和周围的流量方面非常有用，尤其是那些植入心血管系统的设备。使用这些关于血液如何流过或围绕这些心血管装置流动的技术，可以确定很多，并且可以进行设计更改。此外，我们甚至可以使用这些测量结果来估计血液损伤的水平和发生凝血的可能性。为确保我们在工作台上准确表示心血管系统，工程师设计了模拟循环回路或流量回路，允许实验人员模拟用于台式研究的心脏流量和压力波形。例如，Gus Rosenberg 博士在 1970 年代初期开发了宾夕法尼亚州立大学模拟循环回路（Rosenberg 等，1981）。我们还需要为这些特定的流量测量技术模拟血液，以确保流体是透明的，但也模拟血液作为非牛顿流体的行为。我们开发了一种血液模拟物，可以做到这一点，并且与代表心血管装置的丙烯酸模型的折射率相匹配，从而允许激光穿过丙烯酸进入流场而不会发生任何折射。模拟回路和流体对于确保在可控生理条件下以足够的精度获取测量值至关重要。自 1970 年代以来，宾夕法尼亚州立大学一直在开发机械循环支持设备（血泵），这些设备可以帮助患者在等待心脏移植手术时保持生命（前副总统迪克·切尼（Dick Cheney）在等待心脏移植手术时使用了这种技术） .多年来，PIV 和 LDV 已非常成功地用于测量流量并进行设计更改以减少凝块。我们最近的重点是开发脉动式儿科心室辅助装置 (PVAD)，该装置可帮助儿童在接受供体心脏之前保持生命。该装置以气动方式操作，空气脉冲进入腔室，然后使隔膜对聚氨酯尿素囊（PVAD 内的血液接触表面）膨胀。血流从连接到左心室的管子进入设备，通过机械心脏瓣膜进入 PVAD，然后通过设备的出口流过另一个机械心脏瓣膜，进入连接到左心室的管子。升主动脉，如图 8-84a 所示。图 8-84b 显示了通过 PVAD 的流动路径，应该注意的是，它可以放置在成年人的手掌内。第一个 PIV PVAD 研究是确定哪种类型的机械心脏瓣膜（倾斜盘或双叶瓣）将与设备一起使用。图 8-85 说明了部分 PIV 研究结果（Cooper 等，2008）。在这里，我们使用粒子痕迹来检查设备内部的涡流结构如何发展，对于这项技术来说，这是一种确保充分清洗壁（足够的壁剪切）以防止设备内血液接触表面凝结的方法。更紧的旋转会导致整个心动周期的动量更大，并产生更大的涡旋结构。我们的研究小组还研究了通过机械心脏瓣膜的流动特征。在一项研究（Manning 等人，2008 年）中，我们专注于 Bjork-Shiley Monostrut 机械心脏瓣膜（倾斜盘瓣）外壳内的流动，如图 8-86b 所示。我们移除了部分外壳并插入了一个光学窗口，以便进入 LDV 系统。在本研究中，我们没有使用流通回路，而是使用了模拟二尖瓣位置的单次注射室（图 8-86a），因为我们对闭合流体动力学更感兴趣。二尖瓣位于左心房和左心室之间。天然心脏瓣膜，如二尖瓣，是被动的，类似于止回阀，并对心脏不同结构内的压力变化做出反应。在这项研究中，我们测量了流体流过倾斜盘和阀门外壳之间的小间隙的速度，以及倾斜盘关闭时产生的涡流有多大。图 8-87 是流量的示意图，图 8-88 是使用 LDV 在关闭期间阀门外壳撞击周围几毫秒内测量的流量的时间序列。可以在撞击时测量强烈的涡流。这些数据是通过数百次模拟心跳收集的。然后，我们使用这些速度测量值通过关联持续时间和剪切强度来估计潜在的血液损伤量。