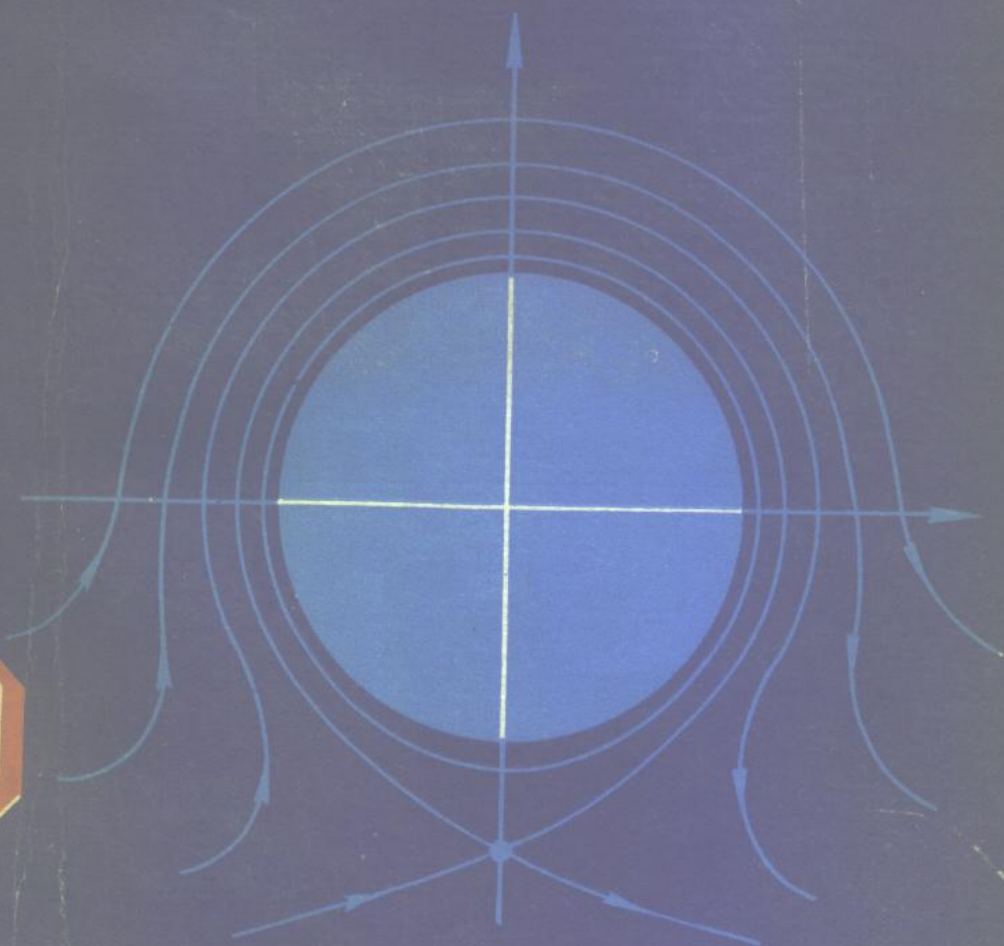


工程流体力学

【苏】Б. Т. 叶姆采夫

关醒凡 于华 译

高等教育出版社



ТЕХНИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕХАНИКА

245230

工程流体力学

[苏] Б. Т. 叶姆采夫

关醒凡 于华 译

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据苏联B. T. 叶姆采夫所著《工程流体力学》1978年版译出。

本书主要讲述不可压缩流体的一般方程和定理以及解决实际流体动力学问题的基本方法。全书共十章：1——液体和气体的基本物理性质；2——流体运动学；3——流体的应力状态；4——流体静力学；5——流体动力学的一般定理和方程；6——粘性流体的一维流动；7——不可压缩流体的有势运动；8——粘性不可压缩流体的层流；9——不可压缩流体的二维湍流；10——理想气体的一维流。原书所附内容索引中释本略去。

本书可作为水利、造船、航空、机械、化工等有关专业的教材或教学参考书，亦可供有关科技人员参考。

本书绪论、二、三、四、五、六、七章由关醒凡同志翻译，一、八、九、十章由于华同志翻译。全书由叶大均和叶宏开同志校订。

本书由刘谦同志编辑加工。

工程流体力学

苏 B·T·叶姆采夫
关醒凡 于华 译

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本850×1168 1/32 印张17.375 字数 430 000

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数00 001—15 60

ISBN7-04-002004-1/TB·118

定价4.75元

前 言

本书的基础是作者多年来在荣获列宁勋章的莫斯科动力学院为《水力机械与自动控制设备》专业的学生讲授《流体力学》课程的讲义。

《流体力学》是培养上述专业人材的基础课程。它是《翼栅流体动力学理论》、《叶片式水力机械理论》、《液压气动自动控制装置》等一系列理论性和应用性学科的基础。该课程在教学计划中的地位 and 使命，决定了它的基本任务是：把流体力学经典定理和方法的叙述与现代工程流体动力学计算方法的叙述结合起来。从现代应用流体力学的大量材料中，列入本书的，主要是与机械制造领域中水力计算有关的问题。作者力求在流体力学一般定理和方程的基础上来叙述这些问题，而掌握和理解这些定理和方程，是自觉地和创造性地利用这些计算方法所必需的。

在选择和编排每一章节的材料时，作者是从以下考虑出发的。

为了更好地理解理论体系和计算方法，读者应当首先获得能在实验中观察到的关于真实流体力学现象性质的正确概念。这样才能更容易、更正确地掌握这些现象的理论模型的实质，才能对理论的前提和适用范围的近似程度形成一个更清晰、更正确的概念。例如，在第二章《运动学》中就介绍了关于实际流体流动的可能运动结构的初步知识，其中包括对层流和湍流运动图形的描述。基于同样的考虑，只是在推导出粘性流体方程之后才叙述理想流体的运动规律。把理想流体的规律性看作是粘性流体相应运动规律的特殊情况的可能性，说明这样来编排材料是有利的。

换句话说，在选择和编排材料时，作者力求实现如下原则：从实际对象到理论模型，从一般到特殊。

本书的内容比在莫斯科动力学院为上述专业讲授的课程内容有所扩充。但是，作者也意识到，并非所有的高等学校对类似的课程都安排有足够的学时数来讲述书中包括的全部章节。为使本书也适用于这些情况，1—6章是这样编排的，即这些章节可以作为独立和完整的工程流体力学教程。7—10章可以作为前六章的补充，而补充的内容应选择对该校最合适的。本书几乎没有包括手册性的材料和实验流体力学的叙述。这些内容对工程教育来说是大量的和重要的。作者的意见是：这些内容应该让学生在完成计算和实验作业的过程中去掌握，并应当为他们提供专门的参考书。

本书供学完高等数学、物理学和理论力学的高等工业学校机械制造系五年半学制的大学生使用。由于本书采用这一方针，故在证明和推导中既可以利用力学定律和定理的一般形式，也可以利用矢量分析、复变函数理论和包括在许多高等工业学校教学大纲中的其它的一些教学内容。在工程流体力学中采用这些理论资料是合理的，这不仅因为借助它可达到叙述的紧凑性和严密性，而且因为根据流体力学来掌握它，可为研究者开辟自由阅读现代科学技术文献的可能性。此外，书中没有采用张量计算，因为这部分数学内容往往不包括在高等工业学校的教学大纲中，或者包括得很少。

考虑到本书所针对的专业的工程特点，作者认为可以牺牲某些证明的完整性和严密性，而只局限于对现象定性方面的描述。书中采用了水力学教程中的某些方式方法，其目的在于获得简单的计算关系。

目 录

前言	1
绪论	1

第一章 液体和气体的基本物理性质

第一节 液态和气态的分子结构及特点	3
第二节 介质的连续性假设	8
第三节 连续介质的密度。液体和气体的体积性质	10
第四节 液体和气体的粘性	14
第五节 液体与气体、固体交界面上的现象	17
第六节 液体的蒸发、沸腾和气蚀现象	20
第七节 流体介质模型和流体力学方法	22

第二章 流体运动学

第一节 描述流体运动的两种方法	26
第二节 流线和流管。流体的流量	33
第三节 连续性方程	37
第四节 在正交曲线坐标系中的连续性方程	41
第五节 流体微团运动的一般特性。柯西-海姆霍兹定理	44
第六节 涡线和涡管。海姆霍兹定理、旋涡的形成	49
第七节 速度环量和斯托克斯定理	54
第八节 无旋或有势运动	58
第九节 不可压缩流体平面流动、流函数和流网	61

第三章 流体的应力状态

第一节 作用在流体上的力	66
第二节 表面应力的性质	68
第三节 用应力形式表示的流体运动方程	71

第四章 流体静力学

第一节	静止流体的欧拉方程及其积分	75
第二节	流体静力学基本公式。巴斯卡定律。水头的概念	78
第三节	流体的相对静止	82
第四节	液体压力对固体壁面的总作用力	85

第五章 流体动力学的一般原理和方程

第一节	关于应力和变形速度之间关系的广义牛顿假设	95
第二节	粘性流体运动方程(纳维-斯托克斯方程)	98
第三节	粘性不可压缩流体流束的伯努利方程	105
第四节	不可压缩流体发展的湍流运动的雷诺方程	108
第五节	关于湍流应力的某些假设	114
第六节	理想流体模型。欧拉运动方程	120
第七节	欧拉方程的积分。理想流体的伯努利方程	124
第八节	旋涡的动力学特性	132
第九节	动量方程和动量矩方程	135
第十节	流体介质的一般能量方程	138
第十一节	流体力学过程的相似	144
第十二节	量纲分析方法	155

第六章 粘性流体的一维流动

第一节	真实流动的一维模型	166
第二节	粘性不可压缩流体的伯努利方程	169
第三节	水力阻力	173
第四节	水头损失通用公式的结构	176
第五节	水力摩擦系数的实验资料	183
第六节	圆管中的层流和向湍流的过渡	188
第七节	管中湍流的速度分布	194
第八节	在湍流状态下管中流体运动的阻力	205
第九节	局部水力阻力	210
第十节	流体经过孔口和管嘴的流动	218

第十一节	管网的水力计算	223
第十二节	不可压缩流体定常流动对固体表面的力的作用(一维问题)	227
第十三节	不可压缩流体的一维非定常运动	234
第十四节	极小惯性影响下的非定常运动、充注及排空容器的时间	237
第十五节	大加速度的情况、管中的水击	240
第十六节	圆管中水击的微分方程	242
第十七节	直接水击和儒柯夫斯基公式	250
第十八节	间接水击和链式方程	254

第七章 不可压缩流体的有势运动

第一节	有势流动的一般性质和流体动力问题的提出	262
第二节	平面有势流动和复变函数的应用	265
第三节	最简单的平面有势流动	268
第四节	均匀来流对圆柱的无环量绕流	278
第五节	有环量的圆柱绕流	284
第六节	关于升力的儒柯夫斯基定理	289
第七节	保角变换法对于绘制平面有势流动的应用	294
第八节	平面有势流动对平板的有环量绕流	298
第九节	关于绕流机翼剖面一般问题的提出	303
第十节	被绕流柱体上压力的主矢量和主力矩的恰普雷金公式	307
第十一节	关于流体动力翼栅升力的儒柯夫斯基定理	312
第十二节	平面无旋射流。物理假设和理论简图	316
第十三节	流体从容器经过阀门和从闸门下面的出流。自由射流和流道中的平板	321
第十四节	气蚀流	337
第十五节	解物体有势绕流平面问题的奇点法	341
第十六节	绘制平面有势流动的近似法	343
第十七节	空间无旋流动和曲线坐标的应用	350
第十八节	轴对称流道中的有势流动	355
第十九节	变厚度轴对称薄层中的运动方程	359

第二十节 简单的空间无旋流动	362
第二十一节 定常有势流动对物体空间绕流的例子	367
第二十二节 在非粘性流体中物体的非定常运动和附加质量的概念	371

第八章 粘性不可压缩流体的层流 (非一维问题)

第一节 粘性流体流动的一般特性	379
第二节 平行平板间的定常层流	381
第三节 圆柱形管和棱柱形管内定常层流一般问题的提法、环形管内的流动	386
第四节 在同轴旋转圆筒间的层流	390
第五节 粘性流体中旋涡的扩散	396
第六节 小雷诺数的近似方程。平面蠕流	400
第七节 粘性流体在变厚度薄层中的流动。润滑层用的雷诺方程	402
第八节 平面楔形润滑层	406
第九节 圆柱滑动轴承的理论基础	412
第十节 纳维-斯托克斯方程的数值解法	418
第十一节 层流边界层。流动结构及其主要参数(平面问题)	422
第十二节 平面层流边界层内的运动方程	427
第十三节 层流边界层方程的一般计算问题和求解方法	433
第十四节 边界层的积分关系式	441
第十五节 层流边界层积分关系式的求解方法	445
第十六节 压力梯度的影响和边界层的分离	454
第十七节 管内层流的起始段	462

第九章 不可压缩流体的二维湍流

第一节 层流的不稳定性和湍流的发生	470
第二节 平行平板间的湍流(平面流道内的流动)	476
第三节 近壁湍流边界层的结构与方程	479
第四节 平板上湍流边界层的计算	481
第五节 具有压力梯度的湍流边界层的计算	488

第六节	淹没式湍流射流	494
-----	---------------	-----

第十章 理想气体的一维流动

第一节	一些热力学关系	509
第二节	伯努利方程的各种形式。气体中小扰动的传播速度	516
第三节	滞止参数和临界速度。等熵公式	519
第四节	气体沿变截面管流动时参数的变化	526
第五节	气体通过收缩喷管从容器内的出流。圣维南-万策尔公 式	529
第六节	正激波	533
第七节	气流的加速和滞止	539
参考文献		542

绪 论

流体力学是研究流体的机械运动规律和制定利用这些规律的方法，以解决实际问题的一门科学。

就分子结构而论，液体介于气体和固体之间的中间状态，因此它不仅具有气体而且还具有可变形固体所固有的性质。这就使得有可能用构成连续介质力学基础的统一的微分方程来描述上述所有介质的机械运动。求解这些方程需要考虑上述每种介质的专门特性，因此，连续介质力学分成许多独立的学科，如流体力学、气体动力学、弹性理论、塑性理论等等。

从力学的观点看，液体和气体的区别仅在于可压缩程度的不同。在这种性质没有表现出来或不是决定性因素的条件下，连续介质运动方程的解法，无论对液体或气体都是相同的。这就是为什么存在称之为流体气体动力学或液体和气体力学的原因。如果这门学科叙述的主要是液体运动的问题，那么，它通常简称为流体力学。

根据理论或实用倾向性的不同，使用理论流体力学、工程（或实用）流体力学这样的名称。在历史上形成了一门称之为水力学的独立的学科。它是工程流体力学的一个分支，其特点一向是所研究的问题主要是一维问题以及广泛采用简化和经验方法求解这些问题，以获得便于在工程实践中利用的结果。许多技术部门直到本世纪中叶仍广泛采用水力学的方法，这在很大程度上是由以下情况所决定的，即虽然理论流体力学取得了巨大成就，但许多工程问题仍未能获得适合于在工程实践中采用的足够严密和精确的解答。摆脱困难的出路是经验公式和大为简化了的计算方案（主

要是一维方案),它们也就构成了水力学的基本内容。但是,由于这些方法的局限性以及新的,更为复杂的问题的出现,迫使必须最大可能地利用理论流体力学的成就,因而理论流体力学的实际成效增加了,特别是由于采用了数值方法和电子计算机。目前,水力学和工程(或实用)流体力学之间的差别正在消失,而且现在看来可以断定,现代水力学就是牢固地建立在经典流体力学理论基础上的工程流体力学。同时,水力学是一门实用的科学,其特点之一是使所得到的解达到便于进行工程计算的形式。

在流体力学中广泛采用数学方法,因此它获得的一系列结果都具有严密性和精确性。但是,由于真实液体和气体运动的机制的复杂性,在大多数对实际很重要的场合不可能获得这样的结果,因此广泛采用近似方程和解这些方程的近似方法。对于这样的计算结果要求作必要的验证,有时还要通过实验来进行修正。此外,在流体力学中,实验是用来对现象进行初步研究的,缺此则不能建立可靠的计算模型。因此,实验在流体力学中的作用是非常重要的。现代的流体力学实验室,是具有复杂和高精度设备的大型研究机构。

流体力学在许多技术部门得到广泛应用,并且是其中不少部门的理论基础。属于后者的有航空、造船、动力机械、原子能、水利建筑和水动力工程、给排水工程、热力工程、水力运输等等。这门科学在化工、轻工、自动控制、生理学、气象学中的作用也很大。对于这些部门中的每一个部门而言,各自都有其流体动力学问题的范围和解决这些问题的相应方法,但它们都是以液体和气体运动和静止的一般规律以及描述流体动力学现象的某些一般方法为基础的。

第一章 液体和气体的 基本物理性质

第一节 液态和气态的分子 结构及特点

物质可处于三种聚集态,即:固态、液态和气态中的任一种状态。其中每一种状态都有其特殊的性质。这些性质是由其原子-分子结构的特点所决定的,而原子-分子结构则与质点间的相互作用力直接有关。这些力就是同时作用并取决于质点间距 r 的吸引力和排斥力。

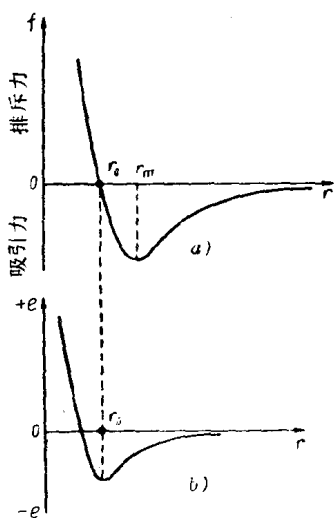


图 1 分子势能和分子间相互作用力与其中心距的关系

关于分子间相互作用力的性质,可用两个孤立的分子为例从定性上加以说明。在某一距离 r_0 下,这两个分子间的相互作用力等于零,即吸引力与排斥力平衡。当 r 增大时,这些力的合力即为吸引力,它起初是(按绝对值)增大的,在某一 r_m 下达到最大值,而后即逐渐减小并接近于零(图1, a)。当分子间距为 $r < r_0$ 时,合力即为排斥力,并随着 r 的减小而迅速增大。分子在这些力的力场中具有势能 $e(r)$ (图1, b)。该势能与力的大小 $f(r)$ 和分子间距的变化 dr 具有以下微分关

系: $de = -f(r)dr$ 。由此可以得出, 在 $f(r_0)=0$ 的 $r=r_0$ 点上, 势能 $e(r)$ 达到最小值, 因为 $de/dr=0$ 。在固体 (晶体) 中, 原子及其它质点 (离子、分子) 的间距约为 r_0 , 相当于最小势能, 在规则排列时还会形成晶格。同时, 其规则性遍及物体的整个体积 (长程序)。决定物体热能的分子运动乃系质点在稳定中心附近的振动。分子键的势能按绝对值来说超过热运动的平均动能。在固体中, 质点振动中心位序的稳定性决定了这些物体的宏观性质: 稳定地保持其体积和形状。

气体在标准条件下, 其分子间距大于 $10r_0$, 相当于弱吸引力, 并且势能的数值是不大的。气体的每个分子, 在运动时实际上是不经受与其它分子的耦合作用的, 这就使得有可能忽略分子间力。完全不考虑分子间吸引力的气体模型称作完全气体。一般假定, 完全气体的分子在碰撞前是匀速和沿直线运动的。所谓碰撞, 一般理解为分子在互相靠近时产生的排斥力的作用下, 其运动方向的急剧变化。

气体的自由而无规则的运动决定了它要向四面八方膨胀, 因而气体没有一定的体积和固有的形状, 而是采取容纳它的容器的形状, 并占有该容器的体积。

容纳气体的容器, 其器壁经受无规则运动分子的冲击。由于这些冲击, 气体对器壁产生力的作用。

根据上述关于气体分子运动的概念可以得出, 对于完全气体来说, 压力 p , 即作用于器壁单位面积上的力, 决定于下面关系式

$$p = \frac{2}{3} n \overline{mc^2} \quad (1-1)$$

式中, n ——气体单位体积内的分子数目; m ——一个分子的质量; C^2 ——气体分子运动速度的均方值。

乘积 nm 乃是单位体积气体的质量, 称作气体密度 ρ 。

理想气体的绝对温度 T ，决定于下式

$$kT = \frac{2}{3} \frac{mc^2}{2} \quad (1-2)$$

式中， k ——玻耳兹曼常数，它等于 1.38×10^{-23} 焦耳/度。

关系式 (1-1) 和 (1-2) 称作气体动力论的基本方程。压力 p ，密度 ρ 和绝对温度 T 是表征气体分子运动状态的量。这些量称作介质状态的热力学参数，并包括在气体宏观运动方程组之内。

若对气体某一体积的界面施加任意的剪力，则气体分子的运动虽然仍是不规则的，但却获得了优先的方向性。这样，就产生了气体沿力的作用方向的流动及其体积的变形。在力作用期间，变形不断增大。任何一个小的剪力在持续作用的条件下，都会引起很大的变形。介质在恒力的作用下无限制地变形的性质称作流动性。因此，气体具有流动的性质。

这种性质并不意味着介质内没有剪切阻力。尽管具有流动性，气体对剪力还是有抵抗的。这种抵抗表现在一定的剪力只能引起一定的变形速度，而要增大变形速度就需要增加力。介质抵抗剪力的性能称作粘性或内摩擦力。

在气体中，粘性决定于分子的无规则运动。例如，在气体各层以速度 u 和 $u + \Delta u$ 作相对位移 (图2) 时，

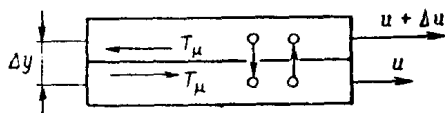


图 2 无规则运动分子的动量交换产生气体的粘性

由于分子的热运动，分子会

由一层向另一层移动，从而产生相应的动量转移。这就会使各层的速度拉平。这种平衡是由于出现了阻碍各层产生相对位移的力 T_μ 所引起的。

为了保持各层以速度差 Δu 进行运动，必须施加外力以克服称作粘性力或内摩擦力的阻力。

两层的分界面单位面积上的粘性力称作粘性 (切) 应力 τ_μ ，

并决定于关系式

$$\tau_{\mu} = \frac{T_{\mu}}{S} \quad (1-3)$$

式中, T_{μ} ——作用于各层接触面积 S 上的内摩擦力。

对于完全气体, 对横穿界面单位面积上的分子质量使用冲量定理可计算出切应力 τ_{μ} 的大小。

因此, 得到关系式

$$\tau_{\mu} = \frac{1}{3} m n \bar{c} l \left| \frac{\Delta u}{\Delta y} \right| \quad (1-4)$$

式中, m ——分子质量; n ——单位体积内的分子数目; $\bar{c}$ ——分子绝对速度的平均值; l ——分子的平均自由行程; $\left| \frac{\Delta u}{\Delta y} \right|$ ——

沿 y 轴单位长度上的速度变化值 (见图2)。

关系式(1-4)可表示为

$$\tau_{\mu} = \mu \left| \frac{\Delta u}{\Delta y} \right|, \quad (1-5)$$

式中,

$$\mu = \frac{1}{3} m n \bar{c} l = \frac{1}{3} \rho \bar{c} l \quad (1-6)$$

称作气体的动力粘性系数。

既然温度升高时, 速度 $\bar{c}$ 增大, 那末气体的动力粘性系数也应增大。

在恒定温度下, 气体密度 ρ 的变化与压力成正比, 两分子的平均自由行程 l 与压力成反比。平均值 $|\bar{c}|$ 仅取决于温度。因此, 由关系式(1-6)可知, 对气体来说, 其粘性系数不应取决于压力。这个结论通过在广泛的压力范围内进行的试验得到了很好的证实。但是, 在稀薄气体所特有的极小压力下和气体接近于液化时的高压力下, 就会显出压力对粘性大小的影响。在这些场合, 随

着压力的增加，粘性即增大。

就分子结构来说，液体位于结晶固体与气体之间的中间位置。有关液体分子结构的资料不如固体和气体结构那样完备。一般认为，液体分子的排列和固体分子一样紧密。关于这一点，固体与其熔体的密度相等可资证明。因此应该认为，液体分子的分子间力和势能具有同固体一样的数量级。液体和固体一样，能稳定地保持其所占据的体积的大小。

液体内分子热运动的性质比固体复杂。根据经过简化的但从定性上看来是可靠的模型，液体分子的热运动是相对于某些中心的不规则振动。个别分子的振动的动能，在某一时刻会达到足以克服分子键的程度。这时，这些分子就有可能以跃迁方式转而包围其它分子，从而改变振动中心。这样，每个分子在称作“定居生活”时间的一定时间 t^* 内，同几个最接近的“邻居”处于整齐的序列之中。液体分子完成几次跃迁之后，就处于已按其它方式排列起来的新分子之中。因此，在液体中观察到的只是分子排列的短程序。分子跃进是无规则的，新的位置决不是由原先的位置所预先决定的。连续不断和大量进行着的分子从一个位置到另一个位置的跃迁式过渡，保证了分子的扩散作用和液体的流动性。若在液体的边界上施加剪切力，则如同气体一样会出现跃迁的优先方向性和沿力的方向产生液体流动。

对于大多数液体来说，这时力的数值无论多么小都可以。然而，也有一些液体，其分子结构非常规则，需要一定的初应力才能实现剪切。这类液体称作塑性液体。若剪切力的作用时间同 t^* 相比很短，则分子一般不会产生连续移动，而液体正如固体一样会对剪切产生弹性阻力。若剪切力的作用时间超过 t^* ，则会产生流动和出现粘性即抗剪力。抗剪力和在气体中一样是与变形速度成正比的。在此场合，液体称作牛顿液体。若抗剪力与变形速度之间的关系不是线性的，或初始剪应力不等于零，则这种液体称