

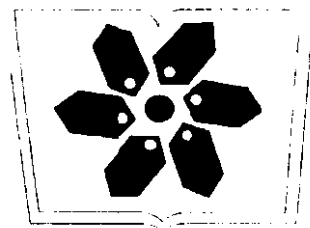
力学名著译丛

流体动力学引论

G.K. 巴特勒 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

丁巳12/19/21

力学名著译丛

流体力学引论

G. K. 巴切勒 著

沈 青 贾 复 译

科 学 出 版 社

1 9 9 7

内 容 简 介

本书是一本优秀的流体力学教程，作者是近代流体力学方面的权威学者之一。

本书系统地介绍了一般流体力学研究取得的基本成果，选材的宗旨是为引导读者熟识流体力学的基本概念、思想及重要应用，着重于阐明流体力学的物理基础。

全书共分七章，前三章是研究任何流体力学的前题和基础，讨论了流体的物理特性、流场运动学及基本方程的一般形式。后四章全部讨论均匀不可压缩粘性流体动力学，就其重要性和基础性而言，这部分内容无疑是全部流体力学的核心部分。

本书可供应用数学及力学工程系的大学生、研究生，以及从事力学、物理、气象、海洋、航空、水利等方面研究的科技人员阅读、参考。

G. K. Batchelor

An Introduction to Fluid Dynamics

Cambridge University Press 1994

力学名著译丛

流体动力学引论

G. K. 巴切勒 著

沈 青 贾 复 译

责任编辑 朴玉芬 鄢德平

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1997年11月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1997年11月第一次印刷 印张: 22 1/2 插页: 12

印数: 1—2 000 字数: 594 000

ISBN 7-03-004632-3/O · 793

定价: 58.00 元

序 言

我曾为准备通过剑桥大学各级数学荣誉考试的学生们讲授流体力学，这时我发现，要选择与课堂讲授配合的教科书是很难的。似乎有不少是为了那些注重流体力学各种工程应用的学生们而写的书，不过，供作为应用数学专业攻读这门课的学生们使用的书就相对很少了，而令人满意的书依我看一本也没有。问题在于：我们对流体动力学许多问题的理解上在最近约 50 年所取得的巨大进展，还没有吸收到为应用数学专业学生写的教材中来。这样，教师要么就不得不在没有教科书的情况下讲授很大一部分内容；要么就只能使自己讲授的内容适合现有的教科书。后一种做法容易不适当地强调这门学科的经典分析方面，特别是无旋流动的数学理论，有可能造成的后果是学生们对流体动力学的极端重要的物理方面一无所知。学生们，教师也一样，倾向于从他们能弄到手的教科书里所讨论的题目形成对一门课的内容的概念。因此，那么多为应用数学家写的在讨论数学上可解但未必与真实流体中发生的现象相联系的问题的流体力学书，并不受欢迎。

因此我打算写这样一本教科书，它能为攻读应用数学的学生所用，并把以往工作所提供的物理方面的理解和信息包括进来。尽管篇幅不小，本书确实是流体力学的一个引论。这就是说，本书不要求事先知道这门课，其中材料的选取旨在给读者介绍重要的概念和应用。本书是由一些讲义教程发展而成的，只有很少材料没有在课堂上试讲过。有些材料是旧的、众所周知的，有些则是相当新的。但对所有材料我都试图以一种从统一的观点看是最好的形式表达出来。本书是作为互为关联的整体而写成的，供人们作为一个整体阅读和使用，或至少大部分内容是这样的，而不是为了供人查阅个别问题或方法。

我特别考虑了英国大学应用数学系二、三、四年级学生们的需求（这也是我最熟悉的），但我希望这本书对工科学生也是有用的。应用数学家和工程师的真正需求如今并不相距遥远。他们都首先需要理解流体动力学的基本原理，不借助高级的数学技巧就能达到这点。熟悉向量分析和张量标记的读者，在阅读本书的纯数学部分时都不会有大的困难。本书相当偏重理论，而不是偏重数学。

我们自始至终都特别注意流动系统的观测与各种概念、解析模型间的相互对应。这里收集的有关流动系统的照片是书的重要组成部分。我希望它们能帮助读者找到一种感觉，这是建立理论论据和分析时所不可缺少的。这点对于没有机会在实验室里观察流动现象的学生尤为重要。Prandtl 的许多书和讲义，依我看来，都极妙地表明如何不断地同时考虑到理论和观测，我自己就受到这些书的巨大影响。Prandtl 尤其深知设计得很好的实验流动系统的一幅清晰照片的价值。他亲自拍摄的许多照片，仍是边界层现象的最好图解。

还要说明一下本书章节的选择和顺序。我最初的想法是要在一卷书中给出流体力学主要分支的一个引论。但很快发现，这种面面俱到的做法与我想达到的透彻性是不相容的。于是我决定只讨论部分内容，至少就这一卷而言是如此。前 3 章为讨论流体力学任何分支打好了基础，讨论了流体的物理性质、流场运动学以及动力学方程的一般形式。这三个引论性的章节的目的表明，流体动力学的各种不同分支是如何统一于作为一个整体的学科之中的，又是如何因对流体或运动的本质做一定的理想化或假设而形成的。一位教师大概不会把所有这些预备性材料都包括到他讲的课程中去，但可以将之改编为适应特定课程的需要。作为基础，我希望它们将是有益的。在其余各章中，流体假设为不可压缩并有均匀密度和粘性。按其基础性的本质和实际的重要性，我认为不可压缩粘性流体的流动是流体动力学的核心。对于具有各种特殊性质的流体的研究目前是时髦的，但大部分基本的动力学概念在

研究具有内摩擦的流体的有旋运动时已能清楚地揭示出来了。就地球物理学、化学工程、水力学、机械工程和航空工程的应用而言,这种研究仍是流体动力学的关键分支。我感到遗憾的是,许多重要课题,诸如气体动力学、表面波、浮力引起的运动、湍流、热与质的传递及磁流体动力学等,显然被忽视了。但在一卷书中认真加以考察,题目简直是太多了。如对本书的反映表明需有第二卷的话,我可能在将来使包含的题目更近乎完备。

至于第4章到第7章的内容安排顺序,我把有关粘性流体运动和大 Reynolds 数流动的描述放在无旋流动(虽然无旋速度分布的许多纯运动学特性已自然地放在第2章里了)和有旋无粘流体运动的讨论之前。采取这种非常规安排的理由,并非因为我觉得无旋运动的“经典”理论不如通常认为的那样重要。这不过是因为,只有搞清楚什么场合下粘性为零的近似成立以后,才能将无粘流体流动的结果做实际的应用。无旋流动的数学理论诚然是解决问题的有力武器,不过它本身并不告诉我们,在大 Reynolds 数下给定流场的整体或其中一部分能否近似地认为是无旋的。为了搞清楚这个至关重要的问题,对于真实流体的粘性效应及边界层理论有一定程度的理解是必要的。当 Lamb 写他的经典专著《流体动力学》时还缺少这样的理解,但如今已然具备。我相信第一部(至少就英语著作而言)表明如此多的通常的流动系统如何借助边界层分离和涡旋运动而得到解释的书是 S. Goldstein 编的《流体动力学的近代发展》。这部 1938 年出版的开创性著作主要是供研究工作者使用的。我现在则试图更进一步使学生们在他们学习流体动力学的早期阶段就得以对真实流体流动有一定的理解。

虽然在考察无粘流体及无旋流动之前学习粘性流体流动是最理想的,但我也理解讲课者受其授课学时的限制。譬如,对于那些只学一门流体力学课程而学时少于 30 讲的学生来说,如果先从粘性流体流动和边界层的研究着手,为描述无粘流体流动及其应用作准备,就不免有失明智,因为为此题目留的时间就会太少了。

在这种情况下，讲课者就需牺牲一点科学逻辑性，或可从第 2，3 章直到跳到第 6 章，包括第 5、第 7 章的前几节。给数学专业的大学生讲流体动力学有一个固有的困难，即对问题的不完全的介绍总是不解决问题的，往往只给学生留下解析方法和结果，而没有告诉他们 什么情况下这些结果可以应用。学生们掌握流体动力学原理确实需要一定的时间，我以为要给非专业的学生们关于这一学科的恰当的介绍，40 至 50 讲是必不可少的。然而，一本书无须与一门课受同样的限制。我希望讲课的人会同意这样的看法：即便在某种讲课中不得不略去诸如边界层分离等许多重要的题目，我们还是希望学生能看到按逻辑顺序安排的全部材料，并能通过阅读增进他们对这一学科的理解。

做习题在理解和掌握流体力学这种分析性很强的学科的过程中是一个重要环节。阅读课文必须伴之以做典型的习题。我原希望能提供许多合适的问题和练习。但是，在已出版的材料中的搜寻并未得到多少可与本书所用的方式合拍的习题，况且，已发表的练习集中于少数几个课题上。针对“现代”流体力学整个领域设想和汇编合适习题的麻烦工作还有待进行。因此，在每章之后仅附有少量的习题。这些习题在一定程度上还要进行选择，以适合听讲人的具体程度和水平。讲课人也可以像我在讲课时所作的那样，把许多没有包括在讲课里的书中的东西变成学生们的练习题。

在本书内容的讲授过程中应配合流体流动的演示，这点同样十分重要。在这方面，工程系的同事们的帮助也许很有必要。现在已经有了许多流体动力学的电影片，这对不做任何实验室工作的应用数学系的学生们尤为宝贵。无论用什么办法，教师总应向他的学生们演示出他的分析与真实流体的行为间的联系。如果把流体力学讲成像作数学习题一样，那就要乏味得多了。

我感谢许多人在本书准备过程中给予我的帮助。很多同事对手稿的一些部分提出了宝贵意见，使我更清楚地看到问题所在。我要特别感谢 Philip Chatwin, John Elder, Emin Erdogan, Ken

Freeman, Michael McIntyre, Keith Moffat, John Thomas 及 Ian Wood, 他们在校对清样的繁重工作中给了帮助。我也感谢所有向我提供或允许我从过去刊物中重印插图和照片的人;感谢 Pamela Baker 小姐和 Anne Powell 小姐, 她们以耐心和娴熟的技巧作了无穷尽的打字工作。此外, 我还感谢剑桥大学出版社的编辑们, 同他们一起工作是一快事。

G. K. B.

1967 年 4 月 剑桥

目 录

序言

第 1 章 流体的物理性质	(1)
1. 1 固体、液体和气体	(1)
1. 2 连续性假设	(5)
1. 3 作用于流体上的体积力和表面力	(7)
1. 4 流体的力学平衡	(17)
1. 5 经典热力学	(24)
1. 6 输运现象	(32)
1. 7 气体的特性	(43)
1. 8 液体的特性	(61)
1. 9 两种介质之间的边界上的条件	(69)
第 2 章 流场运动学	(82)
2. 1 流场表示法	(82)
2. 2 质量守恒	(85)
2. 3 对于一点附近的相对运动的分析	(91)
2. 4 具有给定膨胀率及涡量的速度分布的表达式	(98)
2. 5 膨胀率中的奇异性, 源和汇	(102)
2. 6 涡量分布	(107)
2. 7 具有零膨胀率和零涡量的速度分布	(115)
2. 8 空间双连通区域中的无旋无散流动	(126)
2. 9 伸展到无穷远处的三维流场	(133)
2. 10 伸展到无穷远处的二维流场	(145)
第 3 章 流体运动的基本方程	(153)
3. 1 运动流体中的物质积分	(153)
3. 2 运动方程	(159)
3. 3 应力张量的表达式	(164)
3. 4 运动流体内能的变化	(176)
3. 5 无摩擦非导热流体定常流动的 Bernoulli 定理	(182)

3. 6	控制流体流动的完全方程组	(191)
3. 7	第 1, 2, 3 章的结束语	(198)
第 4 章	均匀不可压缩粘性流体的流动	(202)
4. 1	引言	(202)
4. 2	定常单方向流动	(207)
4. 3	不定常单方向流动	(216)
4. 4	旋转流体中边界上的 Ekman 层	(226)
4. 5	具有圆形流线的流动	(233)
4. 6	从一个动量点源射出的定常射流	(238)
4. 7	动力学相似与 Reynolds 数	(245)
4. 8	惯性力可以忽略的流场	(251)
4. 9	小 Reynolds 数下运动物体引起的流动	(265)
4. 10	小 Reynolds 数下运动物体引起的流动的方程的 Oseen 改进	(279)
4. 11	小粒子稀薄悬浮液的粘性	(287)
4. 12	当 R 从 1 增加到 100 时由运动物体引起的流动中的 变化	(297)
第 5 章	大 Reynolds 数流动: 粘性效应	(307)
5. 1	引言	(307)
5. 2	涡量动力学	(309)
5. 3	Kelvin 环量定理及无粘性流体的涡量定律	(317)
5. 4	从静止产生的运动中的涡量源	(322)
5. 5	对流阻止固体表面处产生的涡量向远方扩散的定常流动	(327)
5. 6	在汇聚或发散通道中的定常二维流动	(340)
5. 7	边界层	(350)
5. 8	平板上的边界层	(357)
5. 9	外流的加速和减速的效应	(364)
5. 10	边界层的分离	(376)
5. 11	流体中定常运动的物体所引起的流动	(382)
5. 12	射流、自由剪切层及尾迹	(396)
5. 13	振动边界层	(407)
5. 14	具有自由面的流动系统	(420)

5. 15 动量定理的应用之举例	(429)
第 6 章 无旋流动理论及其应用	(436)
6. 1 无粘性流体流动理论的作用	(436)
6. 2 无旋流动的一般性质	(439)
6. 3 定常流动: Bernoulli 定理和动量定理的一些应用	(446)
6. 4 运动刚体引起的无旋流动的一般特性	(460)
6. 5 复势对于二维无旋流动的应用	(473)
6. 6 由带有环量的运动柱体引起的二维无旋流动	(490)
6. 7 二维翼型	(504)
6. 8 由运动物体引起的轴对称无旋运动	(520)
6. 9 细长体的近似结果	(536)
6. 10 流体的冲击运动	(546)
6. 11 液体中的大气泡	(550)
6. 12 液体中的气穴	(558)
6. 13 自由流线理论, 定常射流和空穴	(572)
第 7 章 实际为无粘性流体的具有涡量的流动	(589)
7. 1 引言	(589)
7. 2 无穷远处为静止的无界流体中的流动	(601)
7. 3 无穷远处为静止的无界流动中的二维流动	(612)
7. 4 到处具有涡量的流体的定常二维流动	(624)
7. 5 具有旋动的定常轴对称流动	(632)
7. 6 作为整体旋转的流体系统	(646)
7. 7 在旋转球上一薄层内的运动	(659)
7. 8 翼的涡系	(674)
附录	(690)
1. 常见流体的某些物理性质之测量值	(690)
(a) 一个大气压力下的干燥空气	(690)
(b) 标准大气	(691)
(c) 纯水	(691)
(d) 15℃ 和 1 大气压下动量与热扩散性质	(694)
(e) 两种流体间的表面张力	(694)
2. 若干常用向量微分量在正交曲线坐标系中的表达式	(695)
参考文献	(703)

第 1 章 流体的物理性质

1.1 固体、液体和气体

流体（包括气体和液体）的决定性特征在于其易变形。一块固体总具有确定的形状，而且仅当外部条件改变时才会发生形状的改变。但是，一团流体却没有特定的形状，对于均质的流体而言，其不同微元还可以自由地重新排列而不会影响这团流体的宏观性质。当力作用于流体上时，流体的不同微元能够并且一般说来也确实进行相对运动。这个事实就引出流体力学这门学科。

固体与流体之间的区别并不是界线分明的，因为有许多物质，它们的行为在某些方面像固体，而在另一些方面却又像流体。所谓“简单”固体是指这样一种物质，当作用在它上面的力发生微小的变化时，它的形状以及其组成微元之间的相对位置的变化也是微小的。相应地，所谓“简单”流体（对此还没有一个通用的术语）也可以定义为这样一种物质，当适当选取的力作用于其上时，无论这个力多么小，其组成微元间的相对位置可以产生不小的变化。但是，即便可以把这两个定义做得十分精确，我们知道有些物质仍然具有双重性质。触变质（如胶冻或油漆）在它们被静放一段时间后，其性质像弹性固体；当它们在受到摇晃、刷动等剧烈变形后，又失去弹性而像流体。沥青在一般情况下的行为像固体，但如果施于其上的力延续很长时间，它的变形也像流体那样可以无限增大。对于分析学家而言，更棘手的物质是像浓的高分子溶液那样一类物质，它们同时表现出类固体和类液体的行为。

所幸的是，最通常的流体，特别是空气和水，都相当准确地 是上述意义下的简单流体。这说明，本书作为一部引论性教程，把注意力集中在简单流体上是有道理的。在本书中我们将假设：所

讨论的流体不能抵抗住任何由力的作用使其按体积不变的方式变形的趋势。这个定义的含义在我们考察了使流体微元变形的力的性质之后会变得更清楚。同时我们必须注意，简单流体是可以提供阻力以抗拒使其变形的趋向的；定义中所指的是这个阻力不能阻止变形的发生，或者等价地说，这个阻力随着变形率的消失而消失。

既然我们只限于考虑上述所谓简单流体的这种理想化物质，故今后也就无需再用这个名词了，下文中只称它们为流体。

从动力学研究角度看，气体与液体之间的差别远不是本质的。由于与分子间作用力的性质有关的一些理由，绝大多数物质可以在这两种稳定的相态中存在，它们都呈现出流动性或者说易变形性。固然，一般来讲物质处在液相时的密度远大于它处于气相时的密度。但是，这一差别本身并不是区分这两种相态的主要依据。因为这个差别主要导致了要产生一定的加速度所需要的力的大小的不同，而不导致运动形态的不同。液体与气体力学性质的最重要区别在于它们的体积弹性，亦即它们的可压缩性不同。气体远比液体容易压缩，因而在有显著压力变化的任何运动中，对于气体而言随之而产生的比容的变化比液体要大得多。在气象学中作为重力作用于整个大气的结果，或者如在弹道学和航空学中，由固体快速穿过流体而产生的那种非常快的运动中，流体中压力的显著变化都是必须加以考虑的。我们将会看到，在一些常见的场合中，伴随流体运动而发生的压力变化是很微小的。由于液体与气体在这些场合中的比容变化都很微小，因而它们的行为也是相似的。

固体、液体和气体的总的外观特性直接与它们的分子结构及分子间力的性质有关。这一点，我们从把两个孤立的典型分子之间的作用力作为其间距离的函数的一般形式的粗略考察中就可以看到。当两个分子的中心距离 d 很小（对于简单型分子，量级为 10^{-8} 厘米）时，其相互作用是很强的量子力，它既可能是吸引力亦可能是排斥力，这取决于电子层的“交换”的可能性。当电子交换是可能时，分子间力是吸引力并构成化学键；当电子交换是不

可能时，力是排斥力，而且随着分子间距离的增大而迅速衰减。分子中心之间的距离再大一些（比如在 10^{-7} 厘米或 10^{-6} 厘米的量级），两个分子之间的相互作用是微弱的吸引力（假设分子是非电离的——一般温度下通常就是这种情形）。这种聚合力据信开始是以 d^{-7} 规律下降的，当 d 大时最后以 d^{-8} 规律下降。粗略地看，可以认为这个力是由于每个分子在另一分子的影响下产生电极化的结果^①。于是，没有形成化学键的两分子间的相互作用力作为 d 的函数有如图 1.1.1 所示的形状。当分子间距离为 d_0 时，即上面所述的相互作用力改变符号处，一分子相对于另一分子显然处于稳定平衡的位置。对于大多数简单分子， d_0 的量级为 3×10^{-8} — 4×10^{-8} 厘米。

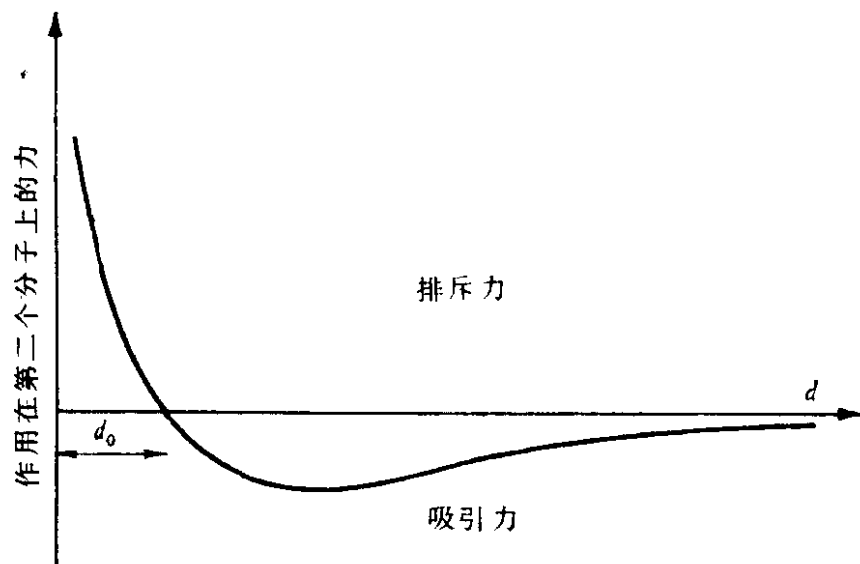


图 1.1.1 由一个(非电离的)简单分子作用于另一个分子上的力作为其中心间距离的函数的示意图

根据一个分子的质量和相应物质的密度，我们可以计算出相邻分子中心之间的平均距离。计算表明：由简单分子组成的物质，在常温常压下，气相的分子间平均距离量级为 $10d_0$ ，而在液相与

^① 例如可参考 E. A. Moelwyn-Hughes 著“States of Matters”(Oliver and Boyd, 1961)

固相中这个平均距离量级为 d_0 。因此，在一般条件下气体的分子彼此相距很远，只有极其微弱的聚合力作用于其间，除非在极少有的机会中，两个分子才会恰巧相遇到一处。在气体运动论中通常假设有所谓的“完全气体”，对于这种气体，一个分子在邻近分子力场中具有 的势能与本身具有的动能相比，小到可以忽略不计。也就是说，这种气体的每一个分子各自独立地运动，除非偶然地发生“碰撞”。但是，在液相和固相中，一个分子总是处于若干邻近分子的强力场之中。诸分子差不多是紧紧地排列在分子间斥力所允许的范围内。在固体情形中，分子的排列实际上是恒定的，还可能具有象晶体那样的简单周期性的结构；分子围绕其稳定位置振动（这种振动能量是固体热能的一部分），但是分子的点阵排列，直到固体温度达到熔点之前，保持完整不变。

大多数物质在熔化时密度要下降百分之几（冰融化为水时密度要增加，这是一个例外）。分子（排列）间距的一个微小变化，却伴随着物质的可运动性（mobility）方面如此巨大的变化，这一点还是不太好理解的。关于液体状态方面的知识尚不完善，看来分子的排列似乎是部分有序的，作为整体具有可运动性的分子群有时与其他分子群规则地排列在一起，有时则可能分裂为更小的一些分子群。分子的排列处于不断变化之中，其结果是任何施于流体的（非容积压缩）力只要保持着，就要产生不断增大的变形。液体的某些分子特性，介于固体与气体之间。这种情况示于下表。就最简单的宏观量密度而论，液体很接近于固体；而在流动性方面又完全与气体类似。

	分子间作用力	分子随机热运动 振幅与 d_0 的比值	分子排列	需用的统计 类型
固体	强	$\ll 1$	有序	量子统计
液体	中等	1 的量级	部分有序	量子统计 + 经典统计
气体	弱	$\gg 1$	无序	经典统计

液体抗拒变形趋向的分子机制与气体不同，不过如我们将要看到的那样，在这两种情形下决定变形率的微分方程式却具有相同的形式。

1.2 连续性假设

气体的诸分子被尺度比分子自身尺度大得多的真空区域分割开。即使对于液体（其分子是在很强的短程斥力所允许的范围内紧紧排列着），物质的质量也是集中在构成分子的原子核中，远不是均匀地分布在液体所占据的体积上。当我们在能展现出单个分子这样小的尺度上考察流体时，流体的其他特性，如组分、速度等等，也同样地具有强烈的非均匀分布。不过，一般来说，流体力学涉及的是物质的大尺度行为，亦即与分子间距离相比为大量的宏观尺度上物质的行为，因而流体的分子结构常常并不需要直接地考虑进来。所以在本书中始终假定：流体的宏观行为就如同它们在结构上是完全连续的一样；并且，与包含在某个小体积内的物质相联系的质量、动量等物理量都将被看成是均匀地分布在该体积内，而并不去严格地根据真实情况把它们看成是只集中在这个体积内的某一小部分中。

这样，一个**连续性假设**的正确性，根据我们日常生活的经验简单地去看是很明显的。事实上，用任何通常的测量仪器观察空气和水的结构和特性时，它们都是如此明显地、连续地和平缓地变化，以致任何其他的假设都显得不自然。

把一个测量仪器置入流体中，仪器就以某种方式反映出某一微小邻域内的流体的一种特性，提供出该特性在所谓“感受”体积内的（有时还要包括在一段微小的“感受”时间内的）有效平均值的量度。一般来说，仪器要选择得使感受体积足够小，使得测量能成为一个“局部”的测量。也就是说，进一步缩小感受体积（在极限范围内）不会改变仪器的读数。流体的粒子性结构一般不影响这种测量的原因在于：虽然感受体积相对于宏观尺度而

言是足够小的，使得测量确实反映局部特性，但它又大得足以包含极大数量的分子，大得足以使得由分子的不同特性所引起的涨落不会影响观察到的平均值。当然，如果感受体积做成小到只包含少数几个分子，那么在每个观察时刻位于感受体积内的分子数目及种类，都会一次与一次不同地涨落，测量结果还将随仪器感受体积的大小变化作无规则变化。图 1.2.1 表示了流体密度的测量与仪器感受体积尺寸之间的依赖关系。从图上可以看到，当对于一个宏观上很小而微观上很大的感受体积，测量所得到的流体特性为常数值时，我们就可以把流体视为连续的。

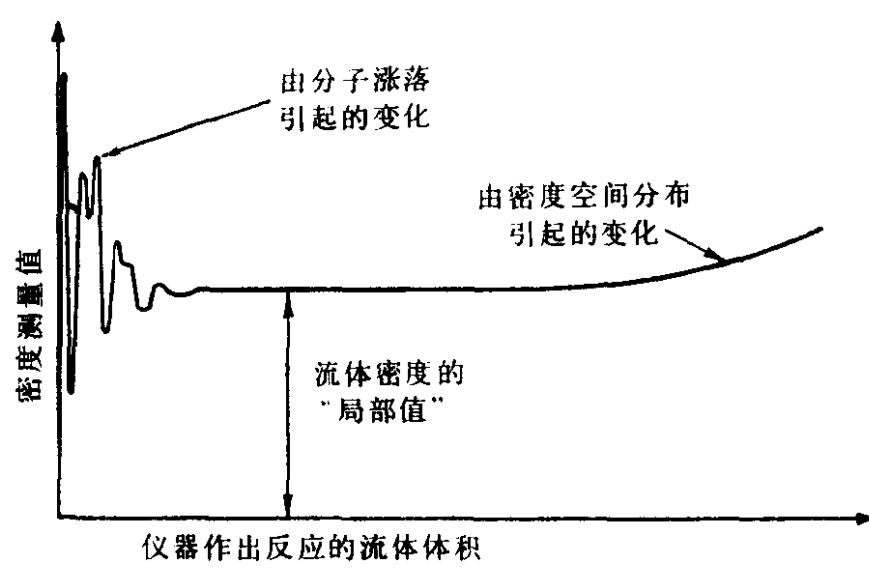


图 1.2.1 仪器感受体积尺寸对于仪器测量所得的密度的影响

用一两个数字就可以表明把流体作为一个整体和把流体视为有粒子性结构的特征长度之间的巨大差别。对于绝大多数实验室流体实验来说，流体所占据的区域的尺寸至少有 1 厘米，而在 10^{-3} 厘米量级的距离上流体的物理学和动力学特性的变化是极其微小的（除了在如激波等特殊地方）。因此一个感受体积为 10^{-9} 厘米³ 的仪器就能给出局部特性的测量值。虽然这个体积很小，但在常温常压下，它仍包含有 3×10^{10} 个空气分子（对于水则包含有更多的分子）。这个体积已是足够大，可以绰绰有余地满足以下要求：即对诸分子求得的平均值与分子数目无关。只有在低