

环境空气动力学引论

(上册)

叶文虎 张霸琛编

北京大学环境科学中心

一九八三年九月

前 言

“环境空气动力学”是一门新的边缘分支学科，它在环境保护的实际工作中和大气湍流扩散的机理研究中以及其它许多与大气环境有关的问题中都有着十分重要的作用。但是由于这门学科正处于形成之中，因而迄今尚无一本令人比较满意的教材或专著。

1979年，为了满足北京大学地球物理系大气物理专业研究生学习的需要，我们两人合作编写了一份“环境空气动力学讲义”。并在研究生班进行了讲授。后来，这一课程被列入了冶金部举办的冶金系统环保技术人员培训班的教学计划，于是我又应邀去讲了一次。

从前两次讲课的反应中来看，我国许多从事环境保护实际工作的技术人员非常需要增加对这一学科的了解。因此，这门课程又被列入这次“全国环境保护科技骨干培训班”的教学计划。为此，我在前两次讲课经验的基础上，结合了近两年国内外研究工作的进展情况以及个人学习和研究的心得体会，重新编写了这份讲义。

鉴于国内从事环境保护实际工作的科技人员中，很多人没有系统地学习过流体力学和湍流理论，而这些内容又是环境空气动力学的必不可少的基础知识，因此在本讲义中花了不少篇幅来介绍流体力学和湍流理论的基本概念和主要内容。目的是企图使读者能对环境空气动力学观察问题的角度，研究问题的思路，解决问题的方法有一个比较清晰、深刻的印象。

正如前面所述，环境空气动力学目前正处在形成的阶段，它的发展十分迅速，因此本讲义只能算是一个学习和研究环境空气动力学的引论。由于本人学术水平有限、实践经验不足，讲义中的缺点、错误、遗漏肯定会有不少，恳切地希望专家、学者以及阅读了本讲义的同志们提出宝贵的意见，以便使它能不断地得到提高与充实。

最后，还要附带声明一点。由于张鹤琛同志正在国外，在重新编写这份讲义时不及去征求他的意见，故讲义中存在的所有问题概由本人负责。

叶文虎 谨识

1983、9.

目 录

第一章: 一门古老而又新兴的边缘学科——代序.....	1
上 篇 流体力学基础	
第二章: 流体力学研究对象的理论模型.....	9
第三章: 描述流体运动的两种经典方法.....	16
第四章: 流体质点的受力与变形.....	28
第五章: 流体力学的基本微分方程组.....	49
第六章: 不可压缩粘性流体的运动.....	61
第七章: 湍流理论.....	85

第一章：一门古老而又新兴的 边缘学科——代序

“环境空气动力学”这一学科名词是本世纪七十年代才开始提出来的，在不到十年的时间里，已经取得了极大地进展。

环境空气动力学的研究内容究竟应该包括那些，迄今为止，看法还不完全一致。这是因为这门学科目前还正处在不断发展逐渐形成之中，因此，在看法上自然会存在着不少分歧。

我们认为环境空气动力学的研究内容，主要地可以概括为以下几类：

1、风环境问题：

大气是在水平气压梯度力，地球自转柯氏力，地面摩擦力的共同作用下发生流动的，这样的流动通常就称之为“风”。由于从地面向上直到一千米左右的高空之间的风与人类活动的关系特别密切，因此这一层大气中风的各种特性是环境空气动力学十分关心的一个研究内容，一般称为“风环境问题”。

由于引起大气发生流动的上述诸因素，都随着时间、地理位置及离地面的高度变化，因此，在我们关心的这一层大气中，风的速度（大小和方向）呈现出系列极其复杂的特征。另外，在太阳的热幅射作用和人类活动所产生的热的作用的影响下，风的温度也具有系列十分复杂的特征。如果用学术术语来概括，那就可以这样说：大气环境中风的速度场和温度场，在空间上是不

均匀的，在时间上是不定常的。

风环境问题的研究直接涉及到风力资源的调查和利用的问题。

在近代，随着世界性“能源危机”的加剧，大力开发风力资源的问题已逐渐提到议事日程上来了。在这里最重要的基础性工作当然是要弄清风力资源的“蕴藏”情况和分布情况。因此环境空气动力学工作者就必须去研究并寻找出一种简便易行、节省人力、物力和时间的调查办法，决不能轻易地建议在全世界范围内到处去设立常年观测站。为此就必须去研究不同地方，不同时间风的基本特性以及它们之间的内在联系。也就是说必须去研究风环境问题。

风环境问题的研究还直接涉及到风灾的预测和避免的问题。

风灾害的预报问题和风资源的调查问题是一个问题的两个方面。我们在打算利用风力资源时总是希望风速能尽可能地大，然而当风速过大或风场具有某几种特殊性质时，它们往往又会给人类的许多活动带来不少的麻烦甚至灾难。比如著名的“晴空湍流”经常使正在起飞或降落的飞机失事；某些山区的“风口”使得整列火车被吹翻；某些高山的“风涡”使得许多优秀的登山运动员受阻甚至无法立足等等。因此，人们迫切希望能对出现这些现象的地点、时间作出比较准确的预报，也就是说，必须研究发生这些现象的机理及其生消规律。

风环境问题的研究还是风扩散问题和风荷载问题研究的基础。

总之，风环境问题在环境空气动力学中具有特殊的重要性，是一个基础性、实用性都很强，理论难度又较大的部分。

2、风扩散问题。

固态、液态或气态粒子在大气中的迁移和扩散规律的问题，是环境保护工作所最关心的问题之一，也是在国际上得到公认的环境空气动力学的核心内容。

这一问题的研究不仅直接与环境保护有关，而且与更广义的环境问题有十分密切的关系。比如沙漠的迁移与防风林的布量；植物种子与花粉的传播；农作物的生长与水汽的蒸发等等。甚至在近代战争中有关化学武器、生物武器的使用与防护等均与这一问题密切相关。

对于防治空气污染问题而言，目前主要有两种途径：一是改造现有的生产流程和发展新的生产工艺，包括对回收处理和综合利用技术的研究，争取逐步减少向大气排放污染物；另一种是选择合适的排放位置、排放高度及排放量，充分利用大气的扩散和自然净化的能力，以减少污染物在地面附近的浓度。这两种方法不是互相排斥而是互相补充的，必须很好的结合起来加以运用。

第一种方法要求有较高的技术水平与生产水平，丰富的能源资源和足够的资金，第二种方式虽无需另外消耗能源，但却要受到大气的扩散能力、自然净化能力及环境容量的限制。目前比较切实可行的作法是在每一个有条件的工厂或工业区建立起一个“大气污染控制监测系统”，这个系统包括经过缜密研究后在工厂周围设立的几个气象和污染物浓度的观察哨以及一个中心处理站。中心处理站根据各个观察哨所提供出来的数据用适用于该处情况的模式对大气污染的趋势作出及时的预报，一旦出现污染浓度超过国家标准的可能时，就采取改变燃料品种或降低生产负荷的办法予以控制。

显然，为了能正确地确定烟囱的合理高度与位置，为了能建

立适用于不同地方的计算模式，我们必须对风扩散规律的问题进行深入地研究。

决定固态，液态和气态粒子在大气中的扩散规律的因素很多，有排放的方式和条件，有粒子本身的物理、化学性质，有风场的性质，有地形地物的特点，还有许多目前尚未认识到的复杂因素。因此，风扩散规律的正确表示，必须既要能体现出基本物理、化学规律的确定性，又要能体现出因素复杂多变的随机性。由此可见，风扩散的规律问题，是一个把数学、力学、大气物理学和大气化学综合在一起的一个边缘性极强的问题，是一个环境空气动力学必须致力研究，难度极大的问题。

3、风荷载问题。

风荷载问题是环境空气动力学所关心的另一类问题。当然，有人把这类问题提为另一种边缘分支学科——“建筑空气动力学”。

不管提法怎样，（这是无关紧要的），首先应该弄清楚的还是问题的实质。

近代，各种各样高大的建筑物和构筑物越来越多，比如楼房，烟囱、冷却塔、电视塔、桥梁等等。为了节约材料同时又保证使用的安全，在设计时必须准确地掌握风荷载的情况。建筑物或构筑物的风荷载一般分为静荷载和动荷载两种，它们决定于当风绕过建筑物或构筑物时，物体表面上的压力分布及其随时间的变化情况。由于风速的大小和方向在空间上的不均匀性，在时间上的不定常性，加之建筑物和构筑物一般又是非流线型的，因此，风荷载问题在学术上可以概括为：不定常非均匀的来流绕非流线型物体的流动问题。特别是由于来流风速中含有频率范围较宽的脉动成份；来流绕过不同形状的物体时还会形成有一定频率范围的脱体涡旋和

波动，因此，物体表面的压力分布也会出现有一定频率范围的脉动。一旦当风压的脉动和物体的固有频率发生耦合时，就将引起物体振动，造成建筑物的损坏甚至倒塌，给人民的生命财产带来严重的损失。因此，风荷载问题是一个与大气环境关系十分密切的课题。

要准确地掌握风荷载的规律，显然必须弄清大气环境中风的各种特性，特别是其湍流特性，同时还必须深入地研究风和各种建筑物或构筑物之间的相互作用。

综上所述可见，环境空气动力学所研究的主要内容几乎全部都是直接来自生产发展的实际需要，具有很强的综合性与应用性，作为一门独立的分支学科，显然有着极强的生命力和广阔的发展前途。

环境空气动力学的研究方法很多，目前主要可以概括为以下三种：

1、现场测试方法。

这一方法是最直接的方法，比较基本也比较真实，是必不可少的。目前，在大量现场观测结果的基础上，已经提炼出许多经验或半经验的实用模式，这些模式已在许多大气环境质量评价的实际工作中发挥了重要的作用。但是由于组织一次现场测试要花费大量的人力、物力和时间，动辄数十万乃至上百万。特别是由于进行现场观测时的气象条件、地形条件和污染源条件难以人为地控制和改变，因此用这种方法来进行规律性的研究和解决实际工程问题都是极其费力的。

2、数值分析方法。

这种方法所需花费的人力、物力和时间均极少，是一种非常

值得注意发展的方法。可以肯定，随着理论研究的不断深入，计算机容量的不断扩大，计算方法不断改进，这种方法的潜力定会逐渐有力地显示出来。但是，由于它对数学模型的准确程度有极大的依赖性，所以目前它还只能解决一些比较简单的问题。

需要在这里顺便指出的是通常所说的模式计算，只是一种应用方法，不是一种研究方法，当然不能属于这里所讲的数值分析方法。

3、实验室模拟方法。

这种方法既具有现场观测方法的直观性，又在人力、物力和时间上比较节省，特别是由于其实验条件可以人为地加以控制，改变和重复，因而在进行机理性的研究和解决复杂条件下的大气环境质量评价工作时，具有较大的优越性。然而，由于实验设备模拟能力的限制，（比如目前还不能有效地模拟出柯氏力效应等），也由于不可能使实验中的全部无量纲相似参数和现场中的相等，所以这种方法也存在着一定的局限性。

显然，这三种方法各有短长，不能够相互取代。因此，在解决实际问题 and 开展机理性研究时，应该将这三种方法很好的结合起来，互相取长补短。只有这样才能正确的建立起一系列的新概念，较好地完善起环境空气动力学的理论体系，在环境科学的实际工作中发挥出较大的作用。

前面曾经说过，环境空气动力学这一学科名词是在本世纪七十年代中才开始正式提出来，然而它的历史渊源却可以上溯到本世纪初。

在1950年以前，许多世界著名的前辈科学家已经在理论上和实验上进行了大量的基础性和前导性的工作，这些工作对环境

空气动力学的发展和形成起了十分重要的奠基作用。在理论工作方面，特别值得提出的有：1904年普朗特提出的“边界层”的概念；1920年泰勒发展的湍流统计理论；1930年冯·卡门提出的湍流相似性理论；1941年哥莫郭洛夫提出的湍流局部各向同性理论以及1945年泰勒发表的连续运动的扩散理论。在实验方面值得大书特书的则是1934年由普朗特和里查德主持，在德国哥廷根流体力学研究所建造的环境风洞。这个风洞试验段的尺寸为：长16米宽1米高0.25米，其下底面用凉水冷却，上底面用蒸汽加热，从而使得试验段的气流形成一定的温度分布。这是世界上出现的第一个环境风洞，它的设计思想至今仍被世界各国所采用。而在风洞中首先开展环境问题实验研究的，则要上推到1929年，在这一年，阿贝进行了绕日本富士山流动的模拟实验，费尔德和温尔登进行了绕直布罗陀角流动的模拟实验。随后，在1941年，希尔洛克和斯塔克尔在密执安大学进行了烟囱烟气在大气中扩散的模拟实验。

从上面所列举的事实不难看出，在这一历史时期中，研究工作有两个明显的特点：一、从事这些研究并作出大量贡献的是一批著名的流体力学家；二、研究的重点是理论探讨和实验模拟，很少涉及到实际应用。

在1950年以后，更精确一点地说，在1951年到1975年这四分之一世纪中，情况发生了明显的变化，研究工作具有着一系列新的特点。首先是社会生产的发展，环境污染的日益严重，有力地推动着这门学科的迅速发展；其次，正因为上述原因，理论研究的成果与水平已远远不能满足实际工作的需要，于是许多气象学家进入了这一研究领域，作出了重大的贡献，特别是使

现场测试这一研究手段迅速地发展了起来；第三则是使这一领域的研究工作呈现出极强的实用性。

在这一历史时期，值得特别提出来的工作主要有：1953年萨顿用流体力学的观点与方法对大气流动所进行的阐述，他发展了普朗特的边界层理论，提出了大气边界层的概念；1954年莫宁——奥布霍夫给出了表征大气中热分层情况的特征长度尺度；1957年哈芬对大气湍流能谱所进行的观测与研究；1961年达芬波特对近地面层中强风的大气湍流能谱所进行的研究并给出了近似表达式；随后帕斯廓尔，史密斯，特纳尔等人对大量的现场观测工作进行了系统的归纳与总结，提炼出一整套便于实用的模式与手册，在许多实际工程问题的解决上发挥了重要的作用。

1975年以来，环境空气动力学这一学科名词被正式提出，这将更加有助于这门学科的理论体系的形成与发展。1976年，在周培源教授的支持下，北京大学力学系成立了“环境空气动力学研究组”这一专门研究机构来开展这一方面的研究工作。几乎与此同时，国外也成立了类似的研究机构；1978年斯考勒则正式发表了专著。

在这里，我们可以断言，在廿世纪的最后廿五年中，环境空气动力学必将得到更加迅速的发展，必将在许多环境问题的解决上发挥出更大的作用。从近年来的发展动态与趋势不难看出，今后环境空气动力学的发展必将具有如下的一些新特点。首先是机理的研究和工程问题的解决将更紧密地结合起来；其次是，数学、力学、气象学及化学工作者将更紧密地结合起来；第三是，现场测试，数值分析，实验室模拟这三种研究手段将更紧密地结合起来。环境空气动力学将在这三个“结合”的基础上进一步发

展。

我们的责任当然是把握住这种发展动向，主动地、自觉地做好这三个“结合”，促进环境空气动力学的发展，更好地为我国的环境工作服务。

上 篇 流体力学基础

第二章：流体力学研究对象的理论模型

流体力学研究的是流动介质的宏观的机械运动规律以及流体和与之相邻的固体之间相互作用的科学。这里所谓的流动介质一般是指气体或液体，当然也可以指掺混了一定尺度固体粒子后的气体或液体，如烟气等。这里所说的“宏观的机械运动”，除了在一些特殊的领域中外，一般指的是所研究的流体运动不包括有生命的活动情况，且所关心的运动尺度又远远大于流体介质的分子运动的平均自由程。

在系统地了解流体力学之前，显然必须首先弄清流体力学研究对象的基本性质及其正确的抽象，也就是说要弄清已经提炼出的一些理论模型。

§ 1. 流体的宏观运动与“连续介质”的理论模型。

根据物质的分子结构理论，物质是由大量的，永不休止地运动并互相碰撞着的分子所构成。由分子或原子所进行的这些运动称为物质的微观运动，是分子物理学的研究内容，一般不属于力

学的研究范围。

力学，包括流体力学、固体力学、弹性力学、塑性力学等等，一般只研究介质的宏观运动。在研究宏观运动时，只考察一个个“微团”所具有的物理、力学性质的变化。实际上，表征这些“微团”物理、力学性质的物理量（密度，速度，压力，温度等）都是该“微团”内大量分子的相应量（质量，速度，动量，动能等）的一种统计平均值。因此在研究介质的宏观运动时，我们将从“微团”出发，而不从复杂的分子结构出发。

所谓“微团”，现在一般称为“流体质点”，也是一种理论上抽象出来的概念，应该辩证地加以理解。就是说，一方面应该把它看成是一个微观上尺度很大的流体体积元，它包含了足够大量的分子，以致可以用统计的方法来得到其总体的平均特性；另一方面又要把它看成是一个在宏观上尺度很小的流体体积元，小到它和流体力学问题所关心的尺度相比是微不足道的，从而可以忽略掉它的大小，只看成是一个几何点。当然，从时间上来说也同样是如此，宏观上的一瞬间在微观上也是充分长的，因而可以保证得到一个稳定的平均值。

多年的理论研究和实验研究表明抽象出“流体质点”这样一个理论概念来是正确的，合理的。比如，在常温常压下，1个立方毫米体积的空气中，大约含有 2.7×10^{26} 个分子，其平均自由程为 10^{-6} 毫米，在一秒钟内，1立方毫米中的分子要碰撞 10^{26} 次，进行着频繁的质量、动量、能量的交换。

今后，一提到“流体质点”，就意味着这是一个尺度为零，但却包含了大量分子的流体体积元。

在建立了这样的“流体质点”概念以后，我们就可以把流体

看成是由这样的流体质点所组成，这样一些流体质点将连续地充满流体所占据的整个空间而不留下任何空隙。就是说，把流体看成是一种由流体质点所组成的连续介质，并且除了有时在极个别的地点上以外，流体宏观物理量的分布也是连续的。

在抽象出“流体质点”和“连续介质”的理论模型后，立即可以看出，在一般情况下，表征流体质点物理、力学性质的各个物理量如速度、压力等，将是流体所占据的空间的空间坐标和时间坐标的连续函数。于是在进行流体力学研究时，数学分析，微分方程等强有力的数学工具得以广泛的应用。

§ 2. 流体的粘性与“理想（无粘）流体”的理论模型。

除了连续性外，流体的另一个基本的宏观特性是它的易流动性，又称易变形性。考察任何一种流体，都可以发现，它几乎可以在没有任何外力的作用下发生变形（只要有足够长的时间），实际上这也正是流体区别于固体的基本点。

须要注意的是，流体对其内部相邻两层流体之间的相对滑动速度是有抵抗的。这种抵抗就是流体的内摩擦作用，也称作流体的粘性。当然，当流体静止或以匀速运动时，流体的粘性就表现不出来了。

牛顿在“自然哲学的数学原理”一书中，首先指出在流体内部存在着内摩擦作用。在该书中牛顿提出了一个假设：流体质点间的内摩擦与流体质点的相对速度成比例。这一假设后来被表达成一个数学公式：

$$\tau = \mu \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta n} = \mu \frac{\partial v}{\partial n}$$

其中 Δv 为相邻两层流体质点之间的相对速度, Δn 为相邻两层流体质点之间 (在与速度相垂直的方向上) 的距离, τ 为流体中单位面积上的内摩擦力, 比例系数 μ 则称为流体的粘性系数, 其量纲为 [千克·秒/米²].

流体粘性系数的大小与流体的分子结构及其所处的外部条件 (如温度) 有关, 例如, 在 15°C 时, 空气的粘性系数 $\mu = 1.82 \times 10^{-6}$ [千克·秒/米²], 水的粘性系数 $\mu = 1.16 \times 10^{-4}$ [千克·秒/米²]. 从微观上来看, 流体的粘性是由于分子的不规则运动, 在两层流体之间频繁地交换动量的一种宏观表现. 这是分子之间动量交换的一种统计平均性质. 自然, 我们也会想到, 在分子之间一定还会存在着质量交换和能量交换的作用, 后面我们将会看到, 与分子之间的质量交换和能量交换相对应的宏观性质则为流体的扩散性和导热性.

虽然粘性是流体的一种极重要的性质, 但是, 在许多实际问题中, 或者由于 μ 值较小, 或者由于相邻两层之间流体质点的相对速度较小, 因而在具体处理时可以不考虑流体粘性的影响. 于是, 在流体力学中就把这些不须要考虑粘性作用的流体称之为“理想流体”或“无粘流体”. 对理想流体或无粘流体的研究, 在流体力学中占有着极为重要的地位, 以后可以看到正是由于恰当地利用了这一理论模型, 才使许多重大的流体力学问题得到了较好的解决.

这里需要顺便提醒一句的是: 流体的粘性虽然是流体的一项重要性质的基本性质, 但它并不是都能用牛顿假设来描述的. 那些必须用更复杂的形式来刻划其粘性的流体已被称之为“非牛顿流体”, 目前, 对非牛顿流体的研究已经形成一个新的分支学科.

§ 3：流体的可压缩性与“不可压缩流体”的理论模型。

前面已经讲到，流体的一大特性是不能承受任何切向作用力，但是它却可以承受法向作用力。当然，不同的流体承受法向作用力的能力是不同的。一般来说，液体比气体具有较大的承受能力。

法向力作用的直接后果将是体积的改变，比如水在一千个大气压的作用下，体积将缩小百分之五。因此，在流体力学中就把流体在压力作用下体积发生改变的这种性质称为流体的可压缩性。由于流体体积的变化可以用流体质点密度的变化来表示，因此，流体的可压缩性一般就用流体质点的密度变化情况来刻画。

严格地说，一切流体，在其运动过程中，由于各种因素如速度、温度和压力的改变，其密度也一定要发生不同程度的改变。但在实际问题中，有时这些密度变化所带来的影响极小，因而可以忽略，这时我们可以把流体看成是不可压缩的。比如水，在常温常压下，密度变化就很小，因此除了一些特殊问题，如水下爆炸等外，一般都可以把它看成是不可压缩流体。即使对于空气，在其流动速度较低时，密度变化也是很小的，比如，在标准状态下，当空气的运动速度从零变为50米/秒时，其密度的变化也仅有1%左右，因此同样可以看成是不可压缩流体。

把流体当作不可压缩流体来处理，在流体力学的研究史上统治了一个很长的历史时期，对流体力学的发展作出了很大的贡献，从廿世纪四十年代开始，随着高速飞机、火箭、导弹、原子弹爆炸等问题的研究需要的增长，才开始对可压缩流体的问题进行系统深入的研究。

§ 4. 流体的传热性与“绝热流体”的理论模型

热，是分子运动的又一种宏观表现，也是物质的基本属性之