

高等空气动力学

〔美〕 吴建民 主编
陈则霖 编译
吴文正

北京航空航天大学出版社

高等空气动力学

吴建民 主编

陈则霖 编译

吴文正

北京航空航天大学出版社

(京)新登字166号

内 容 简 介

本书系统地介绍了近期发展的空气动力理论方法、相似(包括自相似)理论、摄动理论、拓扑分析等,而且以摄动理论为基础,统一处理无粘和粘性问题的,从更高的理论角度来阐述和理解一些经典的空气动力成果。这在国内同类书籍中尚属首次。

本书可作为航空航天工程与科学方面的研究生的空气动力学教科书,亦可供有关的工程师、科研人员参考使用。

高 等 空 气 动 力 学

GAODENG KONGQI DONGLIXUE

[美] 吴建民 主编

陈则霖 编译

吴文正

责任编辑 赵延永

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京农业工程大学印刷厂印装

850×1168 1/32 印张: 19.5 字数: 524千字

1992年8月第一版 1992年8月第一次印刷 印数: 1500册

ISBN 7-81012-311-4/V·026 定价: 5.95元

前 言

在出版此讲稿的前夕，我们非常荣幸地接受我们的同事——学院的访问学者陈则霖和吴文正的邀请，撰写本书的前言。首先感谢他们为将此颇零散的材料编译成一本好的、简明的教科书而付出的辛劳。我们理解整理讲稿需要花费的时间和耐心。当然，我们也衷心感谢出版社以及为本书出版作出贡献的所有人士。

几乎就在二十年前，我们首次在田纳西大学空间研究院讲授高等空气动力学的研究生课程便开始收集、扩充讲稿，以期将其组织为一本教科书。然而，由于极为繁忙的工作，年复一年，我们无法达到此预期的目标。材料过于分散，需作相当大的加工才能出版。讲稿通常是手写的，犹如课堂讨论稿。

从准备讲稿的伊始，我们的哲理就是提出关键问题的概观，显现空气动力学的全貌，以解决问题为准，而无传统的边界，不论是粘性流或无粘流，可压流或不可压流。这样，试图将所有材料融为一体。此途径在研究生的水准上是可行的，因为大多数学生在他们先前的学习中已经接触过一些有关的基本概念。

讲稿严格地按教科书的风格来编写，而不是作为一本专著。重点放在理解流动的物理特征，而不在于它的数学处理。我们设想学生在毕业之后将面临一个现实的世界，从深入的、专门的研究直到实际工程应用。因此，选择的题材广泛、基础深厚、篇幅庞大。由于字数限制，此次出版时删去了相当多的内容；但是，另一方面，这也给教师以方便，可根据学生需要来增加材料。此外，正如任何一门研究生教材，学生应从事自学，通过阅读图书和文献，扩展知识基础，此正是训练研究生的一个不可分割的部分。

尽管我们最近在非定常涡动力学的研究方面非常活跃，然而

很遗憾的是未能整编这方面的资料。我们愿借此机会指出：非定常涡动力学是一个崭新的领域，它的应用将在21世纪趋向成熟，对此80年代崛起的、有前途的研究项目应予以重视。

最后，我们希望：如同我们讲授此课程时的愉快心情，读者也能愉快地开拓空气动力学这令人振奋的阵地，并祝诸位在各自岗位和事业上成功。

吴建民 Jain-Ming Wu
克拉夫特 Edward M. Kraft
美国田纳西州大学空间研究院
UTSI, Tullahoma, Tennessee, U.S.A

重要符号说明

a, c, f, v, t, x	向量
v_1, v_2, v_3	向量 v 的分量
T, P, σ, τ, l	张量
$T_{ij}, P_{ij}, \sigma_{ij}, \tau_{ij}$	张量 T, P, σ, τ 的分量
e_1, e_2, e_3	基本方向的单位向量
e_i, e_j, e_k	直角坐标中基本方向的单位向量
n, i, j, k	单位向量
s	弧长
S	面积
V	体积
T	温度

目 录

重要符号说明

绪 论

第一章 基础概念

- § 1 连续假设, 宏观及微观..... (5)
- § 2 随流体运动的坐标及空间坐标..... (6)
- § 3 运动学初步..... (9)
- § 4 古典热力学的基本概念..... (21)
- 附录——张量初步..... (34)

第二章 一般定律——守恒定律

- § 1 陈述一般定律的基础..... (39)
- § 2 质量守恒..... (40)
- § 3 线动量守恒——柯西运动方程..... (42)
- § 4 角动量守恒——波耳兹曼假设..... (43)
- § 5 能量守恒——能量转换方程..... (45)
- § 6 偏微分方程的分类及性质..... (48)

第三章 特殊定律——空气动力学控制方程

- § 1 基本关系..... (55)
- § 2 空气动力学的一般方程..... (59)
- § 3 方程的特殊形式..... (67)
- § 4 旋涡运动..... (74)
- § 5 无旋运动..... (76)

§ 6 运动方程的第一积分——伯努利定理	(83)
§ 7 克罗柯方程	(86)
§ 8 气体动力学方程的守恒形式	(88)

第四章 相似方法

§ 1 相似概念	(91)
§ 2 量纲分析	(92)
§ 3 分式分析	(96)
§ 4 栓定分析——微分方程的方法	(100)
§ 5 导出自相似的组论方法	(102)
§ 6 例题	(109)

第五章 空气动力学中的摄动法

§ 1 摄动法的概念	(114)
§ 2 正则摄动	(116)
§ 3 变形坐标方法	(121)
§ 4 匹配渐近展开法	(125)
§ 5 中间匹配	(131)
§ 6 多尺度方法	(131)
§ 7 低雷诺数的粘性流	(133)

第六章 空气动力学中的物理概念

§ 1 飞行器绕流及其计算层次	(145)
§ 2 涡区——边界层和薄尾流近似	(150)
§ 3 压缩性和热传导效应	(160)
§ 4 激波	(164)
§ 5 非绝热的气体动力学现象	(174)
§ 6 粘性/无粘流相互作用	(178)

第七章 不可压层流内极限解

- § 1 平面和轴对称边界层理论.....(190)
- § 2 应用于绕无限平板的流动.....(202)
- § 3 有限物体长度效应.....(206)
- § 4 基本高雷诺数内极限解。不可压层流边界层方程.....(215)
- § 5 定常二维流的相似解.....(218)
- § 6 轴对称边界层.....(226)
- § 7 任意三维边界层.....(231)

第八章 可压层流内极限解

- § 1 一般可压层流边界层理论.....(248)
- § 2 粘性与热边界层, 雷诺相似.....(257)
- § 3 Von Mises变换.....(260)
- § 4 无压力梯度下的边界层特性.....(268)
- § 5 带有压力梯度的边界层.....(271)
- § 6 高超音速层流边界层.....(276)

第九章 层流流动稳定性和转换

- § 1 各向同性粘性流体的平行流动的稳定性和.....(284)
- § 2 无粘稳定性理论.....(288)
- § 3 能量平衡关系式, 粘性在稳定性中的作用.....(290)
- § 4 粘性稳定性和Orr-Sommerfeld方程.....(292)
- § 5 稳定性理论与实验比较.....(296)
- § 6 转换到湍流.....(298)

第十章 湍流

- § 1 湍流的特性.....(310)

§ 2 可压流体湍流运动的一般方程.....	(318)
§ 3 湍流剪切力的半经验理论.....	(325)
§ 4 可压湍流边界层方程.....	(339)
§ 5 湍流边界层差分方法.....	(341)
§ 6 湍流边界层积分方法.....	(349)

第十一章 外极限流方法

§ 1 外极限流.....	(368)
§ 2 小扰动简化和气体动力学相似.....	(373)
§ 3 拉普拉斯方程.....	(408)
§ 4 波动方程.....	(419)

第十二章 平面外极限流——翼型理论

§ 1 翼型流的说明.....	(426)
§ 2 亚音速流动, 通过保角变换翼型的精确解.....	(432)
§ 3 跨音速翼型绕流数值计算.....	(438)

第十三章 机翼理论

§ 1 亚音速流中的薄机翼.....	(442)
§ 2 无粘奇异摄动问题.....	(448)
§ 3 亚音速小展弦比机翼.....	(459)
§ 4 跨音速机翼.....	(470)

第十四章 细长体理论

§ 1 轴对称流的展开方法.....	(475)
§ 2 亚音速流和超音速流的解.....	(478)
§ 3 一般的细长体.....	(483)
§ 4 升力细长体流实例.....	(507)
§ 5 超音速流中细长体的压差阻力.....	(512)

§ 6 十字型细长体三角形翼面-弹身组合体的 无粘流分析.....	(519)
附录.....	(535)

第十五章 超音速锥形流

§ 1 基本概念.....	(540)
§ 2 恰普雷金变换及锥形流.....	(551)
§ 3 相容关系.....	(558)
§ 4 锥形机翼的边界条件.....	(561)
§ 5 一些典型的锥形流解.....	(566)

第十六章 三维分离流

§ 1 一般考虑.....	(570)
§ 2 奇点分析.....	(571)
§ 3 奇点的指数.....	(585)
§ 4 三维定常流动分离准则及拓扑规律.....	(589)
§ 5 举例.....	(594)
附录 练习题.....	(596)
主要参考文献.....	(606)

绪 论

一、空气动力学研究对象、内容

空气动力学是一门工程科学，它通过使用流体力学的工具来确定气体流过管道和流过各种形状物体时的特性。许多空气动力学问题是跟飞行中的现象有关，所以空气动力学被称作“飞行科学”。

任何工程科学都建立在理论和实验两方面的基础之上。或许空气动力学较其他科学，在最后成果被使用之前，要更多地依靠实验（最典型的是风洞试验）。莱特兄弟在1903年的第一次飞行是实验空气动力学最独特的胜利，它先于理论空气动力学的发展（普朗特的边界层理论，1904年），这典型地说明理论空气动力学家所面临的困难。但是，对“为什么只是理论或实验，而不是两者结合在一起发展？”的回答是：理论和实验是彼此基本不同的工具，每一个都有本身的抽象方法和近似处理方法，互不相属。在实际研究中，两者都需要。对真实情况，可以通过交叉检查理论和实验结果，使两者十分接近。

对现代空气动力学家来说，计算机为他们增加了一个有重要价值的新工具——计算空气动力学。实验空气动力学、理论空气动力学和计算空气动力学形成了如图1所示的三重关系。一个有才华的空气动力学家应当掌握其中的每一种工具，以协调的方式，综合应用这些工具，解决实际所提出的问题。所以，尽管本教材偏重于理论空气动力学，但这应理解为这是作者所擅长的领域，而不是表明与实验和计算比较，理论有明显的重要性。在教材中，作者将尽力指出理论与实验、计算三者之间的关系。

理论空气动力学所要解决的问题，可作如下概括：

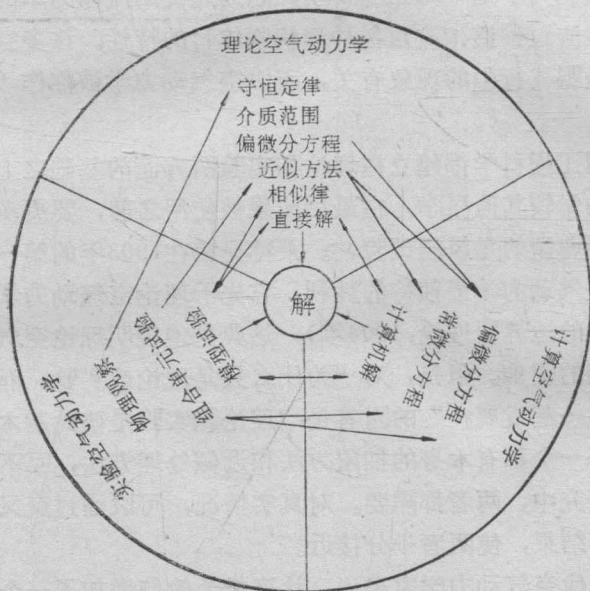
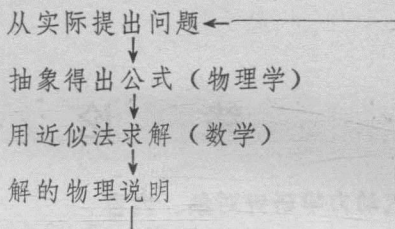


图1 理论空气动力学、实验空气动力学和计算空气动力学之间的三重关系

二、空气动力系统的概念

空气动力学知识，广义讲（也包括气体动力学）是设计任何飞行器的基础，并用来理解与飞行有关的各种物理现象。而这些知识，目前不只限于对飞行，而且对运动装置的表面、风能转换

装置、空气污染控制以至对从建筑物、桥梁到与运动流体介质有关的无数结构和装置都有用。一般来说，空气动力学可以分为外部空气动力学（它主要处理从外部流过物体和组合体的流动）和内部空气动力学（处理通过物体内部的流动）。在许多情况中，上面两种情况可能同时出现。外部与内部流动的主要区别是：一个是其总的流动质量不受限制，另一个则是有限制的流动。风洞中安置的飞机模型是外部、内部流动相互作用的典型情况。在本教材中，将研究外部与内部空气动力学，略为侧重于外部流动现象，并把重点放在飞行方面。不过所讲述的知识对理解一般流体动力学都有用。

所有真实的自然现象都是离散的，非线性的和不守恒的。由于科学思维的能动作用，人类已成功地以线性的、平衡的办法来处理局部的或内在的分系统，用定量的方式描述大量的自然现象，而总的现象可以通过对整个区域进行叠加得到。在许多情况中，总的非线性和非平衡物理现象就可通过这种方式得到理解。在某种程度上，这类似于用许多形状简单的砖块（本身是线性的）来建造一座形状复杂的住房。人类所具有的这种简化、不断近似的能力，是我们区别于其他生物的特性之一。

微分或微商是局部应用线化技术的一个步骤。在数字计算过程中应用的有限差分法，靠计算机的协助，可更快地进行计算及迭代，这是另一个应用线化技术的实例。空气动力学中，我们已掌握了一个极有效的方法，就是通过叠加一些奇点，得到在流体中的复杂几何外形；或分割一个复杂的弹体表面，形成许多小的微元进行计算，这就是面元法。在无数实际例子中，一般都是先将它分割成许多分系统，而后形成合适的总体，或汇总所有分系统以形成总的系统。这就是我们为什么要花这样大的气力来分析流过平板的均匀流，并有兴趣于了解无限平板突动等流动现象的原因。要设计和了解一个好的空气动力系统，必须首先掌握这些基础知识。

三、空气动力学的发展

1904年普朗特首先发表了他的边界层理论，1941年Friedrichs用匹配渐近展开法把普朗特的边界层理论系统地表达出来。按此方法，边界层理论为更一般理论框架内的首项近似，通过进行解的渐近展开来确定完全的运动方程的解。问题简化成所谓奇异摄动，然后采用匹配渐近求解来处理。边界层理论提供给我们一个奇异摄动方法应用的典型例子。后来，Friedrichs、Van Dyke用匹配渐近法说明普朗特的举力线理论。1964年Van Dyke发表了他的专著《流体力学中的摄动方法》，说明了许多1964年以前用摄动法来处理的流体力学问题。从此，摄动法在流体力学中有了广泛的应用并处理了许多更为复杂的问题。

虽然摄动法不是空气动力学中的唯一的理论工具，而且也不是全部空气动力学问题都可以采用摄动法来加以解决。然而，如果能以摄动理论贯穿于空气动力学的始终，无疑将在认识上深入一步，有助于发掘新思路、新方法。同时，还应强调指出：摄动法应用的成功是与对问题的物理上的深刻了解密切相关的。只有正确的物理概念，才可能确定流场中不同区域内的空间尺度、时间尺度以及解的展开形式。

第一章 基础概念

§ 1 连续假设, 宏观与微观

任一具体物体的结构, 在物理上均可看作是一组作微观运动和彼此相互作用的分子和原子。空气动力学通常关心的是比分子之间距离大得多的宏观物质现象。例如多数流体实验中, 我们对流体性质的理解是由机械的、电子-机械的或光学探测器所给出的。它可以取到量级为 10^{-9} 立方厘米体积的样品, 虽然体积是这样小, 在正常温度下它仍含有大约 2.7×10^{10} 个空气分子, 远大于分子平均路程与分子数无关所要求的分子数。仅在空气密度极低的情况下, 如导弹在高空飞行, 或在密度随位置极迅速变化(如在激波中)的情况下, 分子平均自由路程才接近我们所观察的长度范围。因而, 从实验观察来说, 研究气体和液体运动问题时, 假设它是一个连续体似乎更合适。介质连续充满空间, 具有惯性和其他物理性质, 这类具有大量相互作用的、由微团组成的物质, 反映着统计学上的相互关系。

这一连续体假设, 包含着有可能对连续流体某一点的性质给以明确的含意。例如考虑在一物体内部, 体积为 V , m 表示其质量, 则比值

$$\bar{\rho} = m/V \quad (1-1)$$

称为体积 V 的平均密度。对连续介质模型, 设体积 V 减缩为一点时, ρ 有一极限

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \bar{\rho} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

以 ρ 表示 $\bar{\rho}$ 的极限, 称为 V 减缩到给定点的密度。前面的取极限方

法，实际上是物理过程的一种抽象，是为叙述流体运动控制方程确定某点值所必须的，如图 1-1 所示。

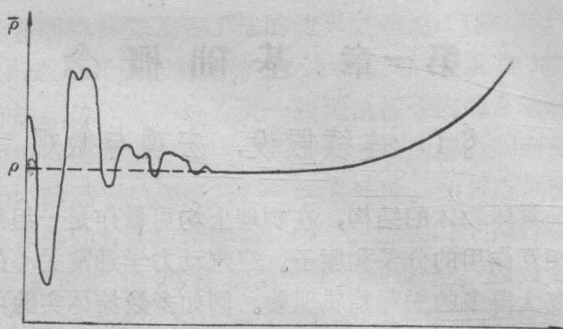


图 1-1

当流体的体积足够小时，由于介质的分子结构，密度不再连续均匀变化。但是将密度曲线外推到 $V = 0$ 处，用连续曲线代替不连续曲线，仍符合方程 (1-1) 的定义要求。

若各点的密度为已知，任何有限体积 V 的质量，通过对体积 V 的积分可以得到

$$m = \iiint_V \rho dV \quad (1-3)$$

某点质量的惯性完全由该点的质量大小确定。有限维数物体的惯性可以由整个物体体积密度分布规律确定。由于具体物体的力学特性是跟对惯性观察、实验数据的概括有关，也由于一质点的惯性是由质量确定，所以由方程 (1-3) 可以推论，密度或许是最基本的流体性质，尽管对使用来说不一定最方便。

§2 随流体运动的坐标及空间坐标

为计算运动流体所作用的力和计算流动的其他效应，如流体的输运，我们一定要能够在数学上描述流动的动力学关系。流体