摄动法及其在流体力学中的应用

〔美〕M. 范戴克 著

科学出版社

摄动法及其在
流体力学中的应用

〔美〕M. 范戴克 著

李家春 译

科 学 出 版 社

1 9 8 7

内 容 简 介

本书是一部摄动法理论与应用并重的优秀著作．系统综述摄动法的一般理论，着重阐述奇异摄动法（包括匹配渐近展开法和变形坐标法），并以不同速度范围（从低亚声速到高超声速）的粘性、无粘性流动问题为实例，说明方法的应用．注释部份介绍了方法的新发展和新应用．

本书可供力学、大气动力学、海洋动力学、声学、光学、应用数学等专业的高年级大学生、研究生、教师和有关科研、工程技术人员参考．

M. Van Dyke

PERTURBATION METHODS IN FLUID MECHANICS

Annotated edition

The Parabolic Press, 1975

摄动法及其在流体力学中的应用

〔美〕M. 范戴克 著

李家春 译

责任编辑 晏名文

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

*

1987年6月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年6月第一次印刷 印张：9 7/8

印数：0001—3,000 字数：217,000

统一书号：13031·3535

本社书号：5175·13—2

定价： 2.35 元

译 者 的 话

虽然“摄动”一词渊源于天体力学，但它同流体力学的发展有着密切的关系.奇异摄动理论在流体力学中的早期应用，可以追溯到 Stokes (1847) 关于非线性深水波理论的研究；Prandtl (1904) 的边界层理论不仅对航空工程的发展有着划时代的意义，而且也是以后发展起来的匹配渐近展开法的物理模型和雏型；Lighthill (1949) 和郭永怀(1953)在研究超声速流锥形激波和平板边界层时，分别发展了 Poincarè (1886) 的思想，形成了著名的 PLK 方法(变形坐标法). 本书全面地阐述了上述经典的和现代的流体力学问题，可以使读者对于奇异摄动理论的概貌和物理背景有比较全面深入的了解.

然而,奇异摄动理论的应用不仅仅局限于流体力学领域.毫不夸张地说,目前，这一理论已经成为从事力学、大气动力学、海洋动力学、声学、光学、应用数学等许多专业的理论研究人员必不可少的手段与工具. 在近期文献中，这种数学方法应用得相当广泛. 但是，这方面的知识恰恰是我国高等教育中所欠缺的. 在本书中,除了流体力学的例子外,还综述了奇异摄动的一般理论,例如奇异性的物理判据,匹配原理，合成法则,最优坐标,改进级数收敛性的理论与方法；介绍了作者本人多年运用这一方法的经验与技巧. 尤其是注释部分，简要地阐述了奇异摄动理论的新进展和新应用. 与同类书籍相比，本书确有其独到之处. 即使对于已经初步掌握奇异摄动法的读者来说,阅读本书也会有所收益. 无疑,本书中译本的出版将受到我国广大读者的欢迎.

译者衷心感谢皮德宝同志，他仔细阅读了原稿，并提出了宝贵意见．由于水平所限，译稿中错误疏漏之处在所难免，恳请读者提出批评和建议。

李家春

一九八五年元月

注 释 版 序

自 1964 年本书问世以来，有关力学中摄动法的科技文献如雨后春笋般地涌现．那时，大家对解决奇异摄动问题的各种方法还不太熟悉，感到它有些高深莫测．但现在，就所有对研究工作感兴趣的人来说，奇异摄动法已经成为他们解析工具的一部分．这一方法在连续介质力学中的应用，起初主要局限于经典的流体动力学和线性弹性理论，现已渗透到更为广泛的领域中去了．原先的方法得到了改进，新的方法正在不断发展．即使仅就流体力学而言，研究论文总数就有好几千．

与此同时，还出版了一些其它书籍来总结和指导这方面的工作。同本书一样带有应用性质的有 Bellman (1964), Cole (1968), Nayfeh (1973) 的书；论述更加数学化一些的有 O'Malley (1968, 1974), Eckhaus(1973) 的著作．

尽管本书涉及面有限，又有上述书籍与之媲美，但它显然仍然有实用价值．直到以平价继续印行、出售使原出版者无利可图时，本书销售量一直尚佳．因为作者不愿提高书价，所以决定亲自再版这版书．

作者借再版之机，校正了书中的一些错误，并在书末添加了一节注释，以使本书能适应新的情况．这些注释是针对于页边有如右所示的那种标记的正文的．这种标记指引读者去了解有关后来发展的讨论和参阅进一步的参考文献。当然，即使书末的文献数目增加了一倍，仍然仅是近十年来所发表论文的一小部分。不过，我们仍尽量把那些不仅同原先的正

文有密切关系，而且还提出了重要新概念、新结果的所有文献都包括进去(参看注 1)。

书评家和读者(不限于流体力学专业)最普遍的意见是：对于自学或作为教科书来说，本书有点过于简洁．尽管如此，本书被选用为大学教科书的场合，比作者所预期的要多．为此目的，每章末尾的习题有时要求过高(有若干情形，实际上不能求解)．在注 3 中，我们尽力改善这种状况．如蒙索取，作者将乐于为同行提供自己编写的题解书，并附以近年来使用的补充题。

自 1959 年后，作者一直执教于 Stanford 大学航空航天系．象原版书一样，注释版是根据一个学期(三个月)的研究生课程的讲义编写而成的．这个版本同样也利用了作者本人及其学生的研究成果，这些工作多年来一直得到空军科研部的支持。

M. 范戴克

Stanford, California

1975 年 6 月

原 版 序

本书主要论述流体力学中的奇异摄动问题.特别是,统一地阐述近十五年来发展起来的两种颇为一般的方法. 这两种方法是同 Lagerstrom, Kaplum 和 Cole 的名字,同 Lighthill 和 Whitham 的名字联系在一起的. 在尚未入门的人看来,本书似乎偏重于摄动理论的反常部分. 这样做与其说是因为其方法新颖,还不如说是由于奇异摄动问题在流体力学中已屡见不鲜,并且在现代研究中日益频繁出现的缘故. 然而,在现有的著作中,还没有一本兼论正则摄动和奇异摄动内容的书,所以,本书仍从对两者都适用的一般方法讲起.

本书主要通过例子进行阐述.除了少数几个数学模型外,这些例子全都取自流体力学. 诚然,所讨论的方法正在应用力学的其它分支迅速得到应用,作者也希望,本书对这些领域的研究人员有所裨益. 不过,上述两种一般方法都是为了解决流体流动问题而提出来的,并主要在这个领域中得到了发展和应用. 事实上,书中大部分例子只限于在本世纪中期被描述为经典空气动力学的那些课题. 然而,奇异摄动问题显然在诸如非平衡流和辐射流、磁流体动力学、等离子体动力学和稀薄气体动力学这样一些新学科中比比皆是. 可以肯定,在上述那些新学科中,以及在海洋学、气象学和研究大范围流体运动的其它领域中,所述方法将会得到卓有成效的应用.

从 1959 年起,作者在 Stanford 大学航空航天系开设了一门研究生课程,本书就是根据当时的一系列讲稿编写而成的,所以,书中自然大量吸取了作者本人及其学生的研究成

果(其中很多工作曾得到空军科研部的支持).

本书的核心部分是第四章中关于绕对称薄翼不可压缩位势流动的研究. 虽然这个问题概念简单,仅涉及二维 Laplace 方程, 却体现了正则摄动和奇异摄动问题的大部分特性. 特别是,它可以引进处理奇异摄动问题的两种标准方法. 因此,在以后各章中要一再提到这个基本问题.

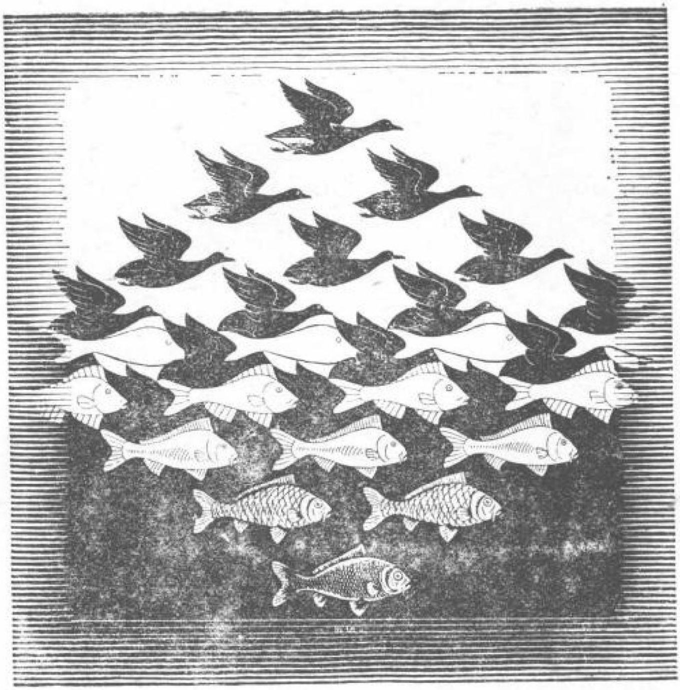
作者建议读者切勿忽视习题. 这些习题简要地概括和引申了正文的内容, 补充了很多细节, 援引了进一步的参考文献.

作者首先要感谢 P. A. Lagerstrom. 他不仅是本书所述解决奇异摄动问题两种主要方法中的一种的共同创始人之一,也是作者的师长、同事和朋友. 书中提出的很多思想也是作者同 R. T. Jones, M. A. Heaslet 和他俩在 Ames 实验室的同事们多年合作的结晶. 作者很多别的同事, 尤其是 O. Burggraf, I-Dee Chang, G. Emanuel, S. Kaplun, S. Nadir, B. Perry 和 A. F. Pillow 曾对本书提出过有益的批评和建议,谨此致谢.

M. 范戴克

Stanford, California

1964年5月



天空与水(M.C. Escher,1938)

这幅版画使人们对一种流动与另一种流动"平滑而难以觉察的融合"产生生动的印象. 这种融合正是第五章所讨论的匹配渐近展开法的核心.

目　　录

第一章　摄动理论的性质

1.1　流体力学中的近似

流体力学这门学科，对于求解非线性偏微分方程起了先驱作用．同许多别的数学物理分支的基本方程不同，支配流体运动的方程基本上是非线性的(更确切地说，是拟线性的)．不管是否计及粘性和可压缩性，都是如此．唯一的重要例外是不可压缩无粘性流体的无旋运动．此运动导致 Laplace 方程，对这个问题已经研究得很充分了．如果不存在自由边界，其非线性性质仅以代数形式出现在 Bernoulli 方程中．

由于存在这种基本的非线性性质，在流体力学的各个分支中，精确解都是十分罕见的．它们通常是相似解．这时，利用高度的对称性，偏微分方程简化成常微分方程．即使对常微分方程必须用数值方法积分的情况，也很需要降格以求把这种解称为"精确解"． Lighthill (1948) 比较完整地罗列了可压缩无粘流的这类解：

(a) 绕凹角的定常超声速流动；

(b) 绕凸角的定常超声速流动；

(c) 绕不偏航圆锥的定常超声速流动；

(d) 无限平板对着静止空气的脉冲运动；

(e) 无限平板离开静止空气的脉冲运动；

(f) 静止空气中圆柱的均匀膨胀；

(g) 静止空气中圆球的均匀膨胀．

还可以根据 Schlichting 的书 (1960) 列出部分不可压缩粘性流动的这类解：