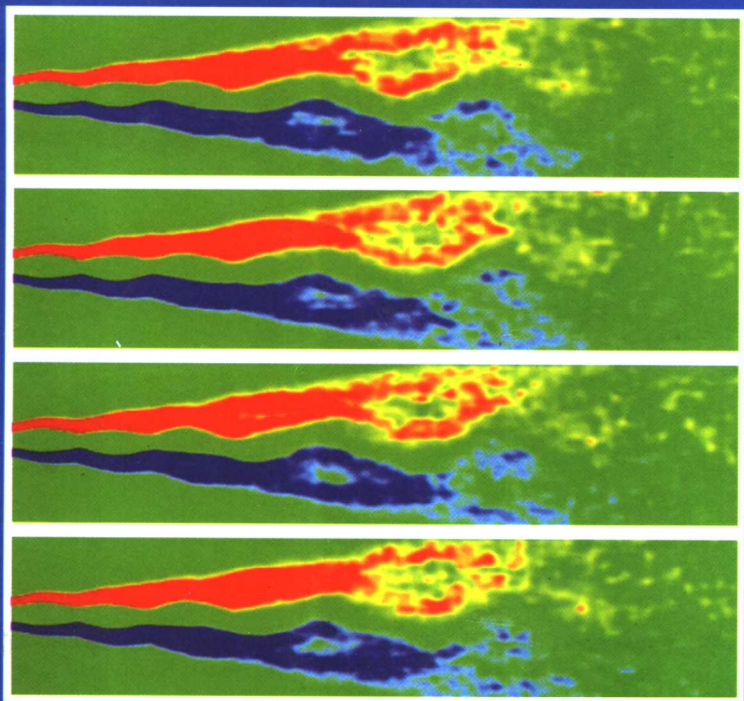


《近代空气动力学丛书》

流动稳定性

Hydrodynamic Stability

周恒 赵耕夫 著



国防工业出版社

流动稳定性

Hydrodynamic Stability

周恒 赵耕夫 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

流动稳定性/周恒, 赵耕夫著. —北京:国防工业出版社, 2004.3

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-03253-0

I. 流... II. ①周...②赵... III. 流动稳定性

IV. 0351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 085459 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 191 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓氏笔划排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是 1994 年开始酝酿的,等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20 世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于 1903 年发明了飞机。到 30 年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学研究为此做出了突出的贡献。1934 年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在 40 年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在 40 年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到 50 年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入 50 年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在 1957 年 10 月 4 日发射了世界上第一颗人造地球卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961 年 4 月 12 日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1 号飞船实现了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于 1969 年

7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力

学部门和全国有关单位的大力协同,以及气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999 年 9 月 9 日

近代空气动力学丛书编辑委员会

组 成 人 员

主 任 委 员 庄逢甘

副 主 任 委 员 张涵信 崔尔杰 贺德馨 张仁杰

委 员 王承尧 王政礼 邓学莹 田 震

(按姓氏笔划为序) 乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨岬生 李椿萱 吴芝萍

吴望一 沈 青 沈孟育 苗瑞生

范洁川 俞鸿儒 蒋 范 程厚梅

舒 玮 童秉纲

前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中,空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战,总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,旋涡与分离流动结构的分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验,风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等,丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书的各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑

委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

1883年 O. Reynolds 通过实验证实圆管流动存在层流和湍流两种不同的流态。20世纪初,Prandtl 提出边界层概念后,人们发现边界层中同样存在层流和湍流两种流态。层流时物体所受的阻力及传热能力和湍流时是大不一样的。而对钝体或以大迎角运动的物体来说,流动的分离位置受边界层是层流还是湍流的影响,这又间接地影响到气动力。因此,对航空航天、船舶、车辆等的设计来说,确定层流到湍流的转换位置非常重要。尽管开始时人们对从层流到湍流的转换这一问题的研究也许曾经以兴趣为主要动力,但现在人们对这一问题继续感兴趣的主要原因显然是它在工程和技术问题上的重要性。

对低速流来说,实验比较容易做,转换位置的确定往往可以通过实验来确定。但对高速流来说,实验既难做又费钱,因而通过理论弄清转换的机理就更为重要。

在 Reynolds 通过实验证实圆管流动存在层流和湍流两种不同流态后不久,就有人提出了是由于层流失稳导致了转换的理论猜想。在 19 世纪,已经有了无粘流的稳定性理论,但无粘流理论无法解释圆管和边界层中的从层流到湍流的转换问题。到 20 世纪初,对粘性流动, Orr 和 Sommerfeld 建立了研究平行流稳定性的小扰动方程,即 Orr - Sommerfeld 方程(以后称 O - S 方程)。但为了解这一方程,以从理论上说明雷诺数大时层流是不稳定的,足足花了 20 年的时间。而从理论上将这一方程求解问题彻底弄清楚,则已是 1945 年了。虽然理论工作者在 1929 年已经求解了 O - S 方程,但在实验上观察到与之对应的现象,却是 1943 年的事。由此可见问题的复杂性。

到 20 世纪 50 年代,有关流动稳定性的线性理论已经弄清楚

了,但并不能解决转捩问题,于是非线性理论应运而生。其实,在1945年,苏联物理学家 Landau 已经提出了一种失稳而导致转捩的机制,但并未能形成具体的理论。1960年 Stuart 提出了有名的弱非线性理论,将 Landau 的设想更具体化了。这一理论曾一度被奉为经典,但我们在后面将要说明,这一理论有很大的缺点。与此同时,从实验中发现了转捩过程中重要的非线性现象,更促进了非线性理论的发展。到20世纪70年代,非线性力学中的分叉理论被移植到流动稳定性理论中来,但这对边界层的转捩问题并未提供多少有用的帮助。20世纪80年代,从实验中又发现了转捩过程中的一些典型的非线性现象。有人提出了二次失稳理论及三波共振理论,对这些现象做出了很好的说明。一时间,似乎转捩问题的解决已不是很远的事了。

但是,事情比预想的要复杂得多。研究稳定性,就必须研究扰动。不同的扰动会导致不同的结果。而扰动的形成,又与外界环境有关。外部的扰动如何转化为流动内部的扰动,又成了一个新的问题,称为感受性(Receptivity)问题。这一问题又牵涉到真实环境中有什么样的扰动,又是一个无法完全确定的问题。然而,无论如何,有了理论的指导,再结合实验和实践经验,人们对转捩的预测,终究有了一些办法。

近二三十年来,计算流体力学及计算机的发展很快,对简单及低雷诺数流动,已经可以对湍流及转捩问题进行直接数值模拟。这对转捩过程的研究很有帮助。但要如飞机、船舶等进行包括边界层中的转捩问题的直接数值模拟,则在最近的将来还是不可能的。也就是说,直接数值模拟还不能取代实验和理论研究。而三者的结合,则为我们提供了有力的研究手段。

以上所说的主要是不可压缩流的情况。对可压缩流,特别是超声速和高超声速流的问题,现在我们所知还不多。理论方面只有线性理论,实验和直接数值模拟都还有很大的困难。但由于航空航天及其他一些工程技术问题对弄清层流至湍流的转捩有迫切的需要,因此尽管这一问题很困难,我们仍要努力去攻克它。

还要说明的是,流动稳定性问题不限于层流至湍流的转换。很多复杂流场的形成,都与某种不稳定的机制有关。世界的多样性,正源于其不稳定性。所以,研究流动稳定性的意义,比研究从层流至湍流的转换更广泛。但本书将仅限于与层流至湍流转捩有关的问题,而且仅限于平行流及近似平行流的问题,如 Poiseuille 流、边界层流、自由剪切流等。

本书前三章由周恒编写,后四章由赵耕夫编写,最后由周恒老师统一校对全稿。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,请读者批评指正。

著 者

目 录

第 1 章 不可压缩平行流稳定性的线性理论	1
1.1 问题和方程	1
1.2 特征值问题解法	6
1.2.1 有限差分法	8
1.2.2 正交函数逼近法	14
1.3 中性曲线及有关实验	17
第 2 章 平行流稳定性的弱非线性理论	20
2.1 Landau 的猜测	20
2.2 Stuart 的弱非线性理论	22
2.3 O-S 方程特征值问题的展开定理及可解条件	30
2.4 弱非线性理论中存在的问题	34
2.5 弱非线性理论的改进方法	38
第 3 章 近似平行流动的稳定性理论	49
3.1 边界层流	49
3.2 自由剪切流	52
3.3 考虑非平行性时的边界层稳定性	55
3.4 扰动方程抛物化法	60
3.5 非线性抛物化方程法	63
3.6 边界层转换预测的 e^N 法	65
3.7 扰动传播速度及方向的问题	67
3.8 三维边界层的横流不稳定性问题	77
3.9 转换过程的一些实验结果	78
3.10 二次失稳理论	82
3.11 三波共振理论	85

第4章 可压缩平板边界层的线性稳定性	87
4.1 基本方程	87
4.2 无粘不稳定性	93
4.3 平板边界层粘性不稳定性	98
第5章 高速三维边界层的线性稳定性	107
5.1 旋转尖锥三维边界层的数值解	108
5.2 可压缩横流不稳定性	130
第6章 边界层的转捩及层流控制	147
6.1 可压缩边界层转捩预测的 e^N 方法	147
6.2 二维及轴对称边界层的转捩预测	150
6.3 后掠翼三维边界层的转捩预测	157
6.4 二维不可压缩边界层的层流控制	167
6.5 超声速、高超声速二维边界层的层流控制	171
6.5.1 压力梯度对稳定性的影响	173
6.5.2 壁面冷却的稳定作用	177
6.5.3 壁面抽吸的稳定作用	181
6.6 可压缩三维边界层的层流控制	184
第7章 可压缩自由剪切层的稳定性	191
7.1 可压缩自由混合层的平均流	191
7.2 自由剪切层的线性稳定性	194
7.3 自由剪切层的大尺度相干结构	205
7.4 自由剪切层的控制	207
附录 A	213
附录 B	215
参考文献	219
主题词索引	225

Contents

Chapter 1	Linear theory of stability for incompressible parallel flows	1
1.1	Basic problems and equations	1
1.2	The solution methods for eigenvalue problems	6
1.2.1	Finite difference method	8
1.2.2	Method of approximation by orthogonal functions	14
1.3	The neutral curve and relevant experiments	17
Chapter 2	Weakly non-linear theory of parallel flow	20
2.1	Landau's conjecture	20
2.2	Stuart's weakly non-linear theory	22
2.3	The expansion theorems of the eigenvalue problem of $O-S$ equation and the solvability condition	30
2.4	Problems in the weakly non-linear theory	34
2.5	The improvement of the weakly non-linear theory	38
Chapter 3	Stability theory of nearly parallel flow	49
3.1	Boundary layer flow	49
3.2	Free shear flow	52
3.3	Stability of boundary layer flow with non-parallel effect	55
3.4	Method of parabolized disturbance equation	60
3.5	Method of non-linear parabolized equation	63
3.6	e^N method for the prediction of transition	65
3.7	Direction of propagation of the disturbance	67
3.8	Cross-flow instability of three dimensional boundary layer	77