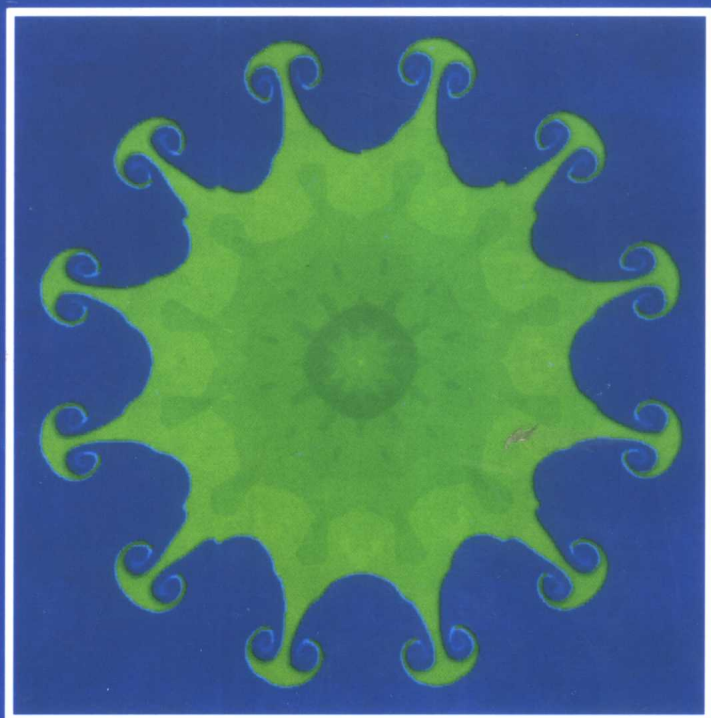


《近代空气动力学丛书》

旋涡流动的稳定性

VORTEX STABILITY

尹协远 孙德军 著



国防工业出版社

责任编辑 吴芝萍

ISBN 7-118-02897-5



9 787118 028973 >

ISBN 7-118-02897-5/O·179

定价:24.00 元

《近代空气动力学丛书》

旋涡流动的稳定性 VORTEX STABILITY

尹协远 孙德军 著

国防工业出版社

《近代空气动力学丛书》

旋涡流动的稳定性

VORTEX STABILITY

尹协远 孙德军 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

旋涡流动的稳定性 / 尹协远, 孙德军著. —北京: 国防工业出版社, 2003.1

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02897-5

I. 旋 ... II. ①尹 ... ②孙 ... III. 涡旋流动—流动稳定性 IV. 0351.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 047888 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 $8\frac{1}{2}$ 218 千字
2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷
印数: 1—2000 册 定价: 24.00 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列选出版。

7A024107

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 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成
(按姓名笔画排序)

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 彭华良 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 世纪初始有飞机出机,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,而空气动力学的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 年代末提出要编定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 号飞航实现

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,全方位空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
(按姓氏笔画为序)

乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨 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。在新型飞机器设计中,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。

Küchemann 有一句名言:“旋涡是流体运动的肌腱”。研究旋涡流动的重要性已被广泛而深刻地认识到,毋须赘言。旋涡流动研究面临两个方面的挑战:一方面要弄清楚旋涡的形成、发展和衰亡以及旋涡之间、旋涡与其它因素(如激波、声和热、不同流体界面和固体表面等)之间相互作用的规律和物理机制;另一方面要研究采用怎样的手段才能对旋涡流动进行有效的控制,以达到趋利减弊之目的。由于旋涡流动固有的复杂性,欲达上述之目的,需从不同方面、不同层次上采用多种科学手段,经过不懈的探索和努力。其中,旋涡流动的稳定性研究是不可或缺的一个重要方面。

多年来,作者及其所在的研究组在童秉纲院士的领导下,一直在从事旋涡流动及其稳定性的研究,先后参加了两项国家自然科学基金重大项目和三个面上项目的研究,其主题都是有关旋涡起主导作用的复杂流动的机理及控制的。我们的主要工作是选择有代表性的典型流动,如钝体尾迹和有轴向流的旋涡流动(swirling flow),运用稳定性分析、非线性动力系统理论以及直接数值模拟相结合的方法,研究它们从早期失稳到非线性演化阶段的运动规律和机理。本书是在他的建议和指导下,把上述研究的成果总结、扩充,并结合了国内外最新研究进展编写而成的。因此,本书并非是全面介绍流动稳定性的专著,甚至也没有论及旋涡流动稳定性的所有方面,而是围绕旋涡流动稳定性有代表性的若干专题展开讨论的。但为了论述的系统性和完整性,以便不太熟悉这些专题的读者能从本书获益,我们增加了必要的背景知识。

全书共 7 章。第 1 章流动稳定性引论，扼要地介绍流动稳定性的基本概念及典型的不稳定流动现象。本章着重物理概念和流动图像的阐述而不是严格的数学论证，目的在于给不太熟悉流动稳定性的读者以必要的预备知识。第 2 章讲述绝对和对流不稳定性的基本概念及其判别准则，它也是后面有关章节的理论基础。用绝对和对流不稳定性理论研究旋涡流动稳定性是本书的重点，而该理论在一般的流动稳定性著作中还很少涉及。圆柱绕流问题是流体力学的经典课题，接下来两章的内容即是关于圆柱尾迹的稳定性及控制。第 3 章主要论述静止圆柱绕流的尾迹动力学特性，包括从小 Reynolds 数的 Stokes 流，到有 Föppl 涡对的定常流，再到 Kármán 涡街的形成，以及发展到三维流向涡等一系列复杂的演化过程，并从绝对和对流不稳定性理论、非线性动力学的分叉理论等多方面揭示了其中的不稳定性机理。在该章中将阐明 Kármán 涡街是一个自持振荡的整体不稳定系统，维持其自持振荡的能量来源于紧靠圆柱近迹中存在足够大的绝对不稳定区域。Kármán 涡街的形成是 N-S 方程经历了第一次 Hopf 分叉的结果，这种分叉是由于尾迹的整体不稳定性引起的。在第 4 章中，我们将讨论振动圆柱尾迹的动力学和控制，包括涡街的激发和抑制、锁定和非锁定现象、周期解的 Floquet 稳定性分析等，并对涡控制的主要方式如被动控制、开环主动控制、闭环控制等作简要的介绍。绝对和对流不稳定性理论为流动控制提供了理论基础，使得人们对流动控制的机理有了新的认识，从而促进新型的控制方法的产生。第 5 章阐述的是近年来另一个相当活跃的领域，即具有轴向流的旋涡流动的稳定性研究。此类流动在自然界和工程上普遍存在，有着广泛的应用背景，台风、细长机翼上的脱体涡、发动机中燃料和空气的混合、气动噪声的控制等都与这类流动的稳定性特性有着密切的关系。在第 5 章中我们着重介绍旋涡的线性稳定性特性，包括代表喷管出口附近的旋涡射流及代表远下游环境的 Batchelor 涡的不稳定特性，特别是尾迹型流动的绝对不稳定性特性，给出了绝对和对流不稳定性的转变边

界。超声速混合增强是超燃发动机研制中的关键技术,流向涡(例如利用瓣状后缘混合器产生旋拧流等)是增强超声速混合的有效途径。所以在本章中还叙述了可压缩性对不稳定性的影响。在第6章中介绍旋涡不稳定的另一个重要方面,即应变场中旋涡流动的不稳定性,包括椭圆不稳定性、直涡丝和薄涡环的短波不稳定性以及 Crow 的长波不稳定性。学术界对椭圆不稳定性机理的发现予以了高度的评价,认为它是从二维有组织的大尺度涡结构(例如剪切层卷起的集中涡)到三维小尺度结构生成的一种普适的机理。有趣的是最初源于航空空气动力学的这些不稳定性理论,目前在湍流理论的研究中找到了新的应用和发展。

对于研究像旋拧射流(也包括其它旋涡起主导作用的)那样的复杂流动,虽然线性稳定性理论可以正确预测早期发展阶段,但它有其局限性。对于丰富的非线性演化的动力学特性,目前一个行之有效的方法是直接数值模拟与流动稳定性理论、涡动力学理论和动力系统定性理论等相结合,用这些理论分析直接数值模拟的结果,揭示其物理机理。因此,我们在最后一章,即第7章介绍了旋拧射流的直接数值模拟结果和非线性演化的动力学特性,作为以上线性稳定性理论不足的补充。

本书中希望强调这样一点:旋涡流动的稳定性研究不仅是理论流体力学家的事,对工程师也很重要。工程师们可以把旋涡流动稳定性理论得到的结果和阐明的机理应用到诸如流动控制、增升减阻、减振降噪等工程实践方面,发挥重要作用。本书希望成为理论和实际应用之间的一座桥梁。

本书可看成是“涡运动理论”(童秉纲等,中国科学技术大学出版社)一书的姊妹篇。在那里着重阐述了涡运动的基本现象和基本理论,而本书则是介绍了涡运动稳定性的若干专题,两者可以结合阅读。作者感谢国家自然科学基金委,没有他们的资助就不可能开展相关课题的研究。作者还感谢国防出版基金和国防工业出版社,使该书得以出版。作者感谢张兆顺教授、邓学蓓教授对本书初稿提出的宝贵意见。马东军、秦丰华、孙亮、刘昆、王安等同学为

本书的打印和插图等付出了辛苦的劳动,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,错误和不当之处在所难免,衷心期望读者批评指正。

安徽 合肥
中国科学技术大学
2002 年