

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

分离流与旋涡运动的 结构分析

中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

《国防科研试验工程技术系列教材》
空气动力系统

分离流与旋涡运动的 结构分析

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

分离流与旋涡运动的结构分析/中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京: 国防工业出版社, 2002. 1

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统

ISBN 7-118-02610-7

I. 分... II. 中... III. ①分离流动-航空学: 空气动力学-分析(力学)-教材 ②涡旋流动-航空学: 空气动力学-分析(力学)-教材 IV. V211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 046082 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路33号)

(邮政编码: 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 10.25 字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1-1000 册 定价: 16.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材》 总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委员 (以下按姓氏笔划排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 峰 陶有勤 郭詮水

钱玉民

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王 侃 张志成 萧泰顺
刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清
桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王 侃

秘 书 赵志根 沈秀春

分离流与旋涡运动的 结构分析

张涵信 著

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业40年来重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关,型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001年3月

前 言

流动分离随处可见。风吹过建筑物出现分离;汽车、飞机、导弹在空气中运动出现分离;石油、天然气在管道内流动,当管道扩张或者管道截面突然变化时会出现分离;血液在血管中流动,遇到血管粥样硬化也会分离。旋涡是分离流动的肌腱,分离流总伴随有旋涡的运动。面对如此常见的分离和旋涡运动,人们已经认识到:它会带来不利影响,像龙卷风的破坏,风对建筑物结构和强度的损害,汽车、飞机等阻力的增大;但是,分离和旋涡是可以控制的,如果控制得好,它会产生有利作用,像分离涡流型在飞机增升中的应用。

人们希望研究分离流和旋涡运动。希望弄清什么叫分离流和旋涡运动?在什么条件下会产生分离和旋涡?分离和旋涡形成后,它是如何发展和演化的?分离流和旋涡运动如何确定?其流场如何预测或计算?如何进行控制和利用?在这种需求下,分离流和旋涡运动吸引了很多人开展其研究,并发展为专门的学科,其研究内容是丰富多彩的。但是应该指出,由于分离流和旋涡运动是复杂的,自然界和工程界被绕物体形状各异,再加上流动多是三维非定常的非线性问题。因此现在关于分离流和旋涡运动的认识,还远没达到完全了解的目标。已有的研究成果和结论,多局限于定常流动。本书主要研究定常流,并且仅从拓扑的角度来分析分离流和旋涡运动的表面和横截面流的演化、发展特征,阐明流动的拓扑规律,从而可揭示分离流和旋涡运动的定性规律和流动结构。全书涉及的内容,均为作者近年来的研究成果。

本书编写过程中,得到有关方面和很多同志的帮助,谨致诚挚的感谢,尤其应该提到的是叶友达、黎作武、袁先旭、刘金合、王振

亚、谢煜飞等,再次致谢。

由于水平有限,书中缺点、错误难免,敬请读者指出,以便修正。

张涵信

2001 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究分离流和旋涡运动的意义	1
1.2 分离流和旋涡运动的主要研究内容	2
第 2 章 二维定常粘性流动的分离模式、识别条件及分离点	
附近流动的性状	4
2.1 分离模式——普朗特图像	4
2.2 分离的识别——判定分离的条件	5
2.2.1 分离必须满足的条件	5
2.2.2 满足条件式(2-6)时,流动必然出现分离	7
2.3 实际粘性流动在分离点附近的性状	9
2.3.1 过分离点的流线	9
2.3.2 过分离点的零 u 线	11
2.3.3 过分离点的零涡线	11
2.4 边界层方程所描述的流动在分离点处的性状	12
2.4.1 分离点是边界层方程解的奇点	13
2.4.2 分离点附近($x \leq 0$)流线的性状	14
2.5 小结	15
参考文献	16
第 3 章 二维定常分离流动的定性描述——拓扑分析	17
3.1 二维定常分离流场的定性分析理论——拓扑规律	17
3.1.1 场内鞍点或中心点规律	17
3.1.2 边界鞍点规律	19
3.1.3 奇点总数规律	21
3.2 拓扑规律在二维定常分离流动中的应用	22

3.3 分离流场内的等压力线的特征	25
3.4 小结	29
参考文献	30
第4章 三维定常粘性流动分离的识别	31
4.1 引言	31
4.2 判定流动分离的条件	32
4.2.1 分离流面从物面离开的条件	33
4.2.2 伴随条件	35
4.2.3 判定流动分离的条件	37
4.3 判定流动附着条件	37
4.4 NS 方程所描述的分离线的性状问题	39
4.5 边界层方程所描述的分离线的性状问题	43
4.5.1 分离线处的 Goldstein 奇性问题	43
4.5.2 分离线处流动的特征	46
4.6 小结	50
参考文献	52
第5章 三维分离流动表面流态的定性描述	53
5.1 表面流的表述	53
5.2 物面上表面流方程的临界点或奇点	55
5.3 分离线上奇点的分布	57
5.4 附着线上奇点的分布	63
5.5 小结	64
参考文献	65
第6章 垂直于体轴的横截面流态的拓扑	66
6.1 横截面轮廓线附近,截面流线的性状—— 奇点分布的规则	66
6.2 截面的对称轴上奇点的特征和分布规则	69
6.3 横截面上截面流线方程奇点总数的规则	74
6.4 横截面流态拓扑结构的稳定性	77
6.4.1 流场结构稳定性理论	77

6.4.2 圆锥有攻角绕流时对称流场的结构稳定性分析	78
6.4.3 数值模拟的结果	79
6.5 小结	82
参考文献	83
第7章 旋涡沿其轴线的分叉演变规律	84
7.1 旋涡横截面流态及其沿轴向的演变	84
7.2 亚、超声速旋涡流动特征的差别	90
7.3 小结	96
参考文献	97
第8章 对定性分析理论的数值模拟和实验验证	98
8.1 二维流动拓扑结构的验证	98
8.1.1 翼型的外部低速绕流	98
8.1.2 方腔内的流动	100
8.1.3 二维剪切层流动的时间问题	101
8.2 分离、再附条件和表面流拓扑结构的验证	104
8.3 横向流拓扑结构的验证	114
8.3.1 钝锥有攻角绕流	114
8.3.2 飞船有攻角绕流	115
8.4 旋涡横截面流态沿其轴线演变规律的验证	119
8.4.1 扩张管道内超声速旋涡的运动	119
8.4.2 三角翼有攻角绕流	121
8.5 小结	127
参考文献	128

第1章 绪 论

1.1 研究分离流和旋涡运动的意义

分离流和旋涡运动是最常遇到的流动现象,例如物体绕流时背风区的流动,平面或曲面上突出物绕流时周围流体的运动,物面与物面交界处的流动,扩张管道内流体的运动,具有激波干扰的边界层内的流动等,都出现分离流动。旋涡是分离流动的肌腱,分离形成旋涡,旋涡的运动、发展和破裂反过来又影响分离流场。

分离流和旋涡运动的产生使流场发生重大变化,例如,它可改变无分离时流场的压力分布、摩阻分布,甚至产生脉动压力,这些将使被绕物体产生颤振和抖振,影响结构的强度和稳定性。

分离流和旋涡的存在,还可以用来改善飞机的气动特性。三角机翼背风区分离流、旋涡的形成,可以提高其升力——非线性涡升力,从而飞机由小攻角飞行可以实现大攻角机动飞行。当三角翼作非定常快速俯仰时,分离流和旋涡运动可产生非定常的超升力,从而进一步使飞机产生超速机动。在高超声速绕流情况下,分离流场可大大恶化受热环境,特别激波边界层出现干扰的区域,热流大大增加。在发动机的研究中,人们常常利用分离和旋涡增强燃料和氧化剂的混合,用来增强燃烧,提高燃烧效率。

化工中也常利用分离和旋涡增强化学反应。

总之,分离流和旋涡的存在,与人类的工程实践有密切关系,人们希望能充分控制、利用分离流和旋涡运动,以最大限度地限制其不利影响和发挥其有利贡献。然而要做到这一点,必须充分认识和揭示分离流和旋涡运动的流动机理和规律。正是因为这种需求,分离流和旋涡运动的研究成为近十几年来的热门课题。开展

分离流和旋涡运动的研究,对发展流体力学学科有重要意义。

大家知道,湍流是由大大小小的旋涡组成的。在这个意义上来说,深入研究旋涡运动,研究旋涡的形成、演变、破裂和消失的规律,对湍流研究也有意义。

1.2 分离流和旋涡运动的 主要内容

根据航空航天飞行器设计和其他工程的需求,分离流和旋涡运动的主要研究内容可概括为如下三个方面:

1. 流动机理研究

这里希望阐明分离流和旋涡运动是如何形成的?它们在什么条件下出现?如何识别或判别流动分离?分离流动的性状是什么?旋涡是怎样演化的,其内在机理和规律是什么?为什么会产生非线性涡升力和非定常超升力?为什么会产生非对称分离?为什么会产生旋涡破裂和产生非对称的旋涡破裂?什么叫非定常的分离?非定常的分离形态是什么?等等,还有其他一些问题。

2. 分离流和旋涡运动的定量研究

这里希望利用理论、计算和实验手段,定量给出分离流和旋涡运动的流场,给出作用在表面上的压力分布、摩擦分布和热流分布,在高超声速情况下还希望给出有化学反应的分离流场的特征。在理论研究方面,过去研究小分离区的流动,曾发展了边界层的方法、三层分析理论和其他近似分析方法,对于旋涡运动也发展了类似于边界层的积分近似方法。在数值计算方面,近年来求解 NS 方程技术得到了很大发展,非常复杂的分离流场和旋涡运动的流场都可用 NS 方程的数值求解方法给出。在实验研究方面,压力量测技术、表面摩阻和热流量测技术,以及流场显示技术的发展,也使分离流和旋涡运动的定量研究有长足的进步。

3. 分离流和旋涡运动的控制和利用研究