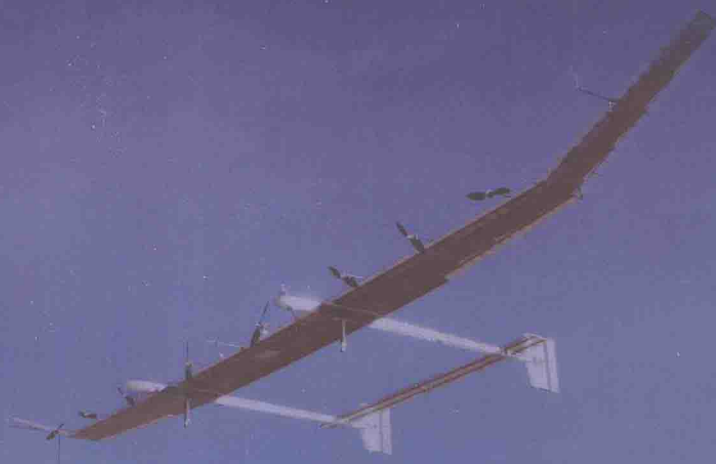




航天科技图书出版基金资助出版

飞行器低雷诺数 空气动力学

李锋 白鹏 等著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

飞行器低雷诺数空气动力学

李锋 白鹏 等著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

飞行器低雷诺数空气动力学 / 李锋等著. -- 北京 :
中国宇航出版社, 2017. 3

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1270 - 7

I. ①飞… II. ①李… III. ①飞行器—空气动力学
IV. ①V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020748 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍 封面设计 宇星文化

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网 址 www.caphbook.com

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2017 年 3 月第 1 版
2017 年 3 月第 1 次印刷

规 格 787 × 1092

开 本 1/16

印 张 16.75

字 数 408 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1270 - 7

定 价 168.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快的发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序

近年来,随着临近空间低速飞行器、高空无人机和微型飞行器的快速发展,针对这类飞行器的低雷诺数空气动力学和相关力学问题的研究日益受到重视。这类飞行器的机翼、安定面、舵面、螺旋桨等部件的雷诺数在 $10^4\sim 10^5$ 范围,这时在翼面往往会形成不同形态的层流分离泡,流场结构变化及其非常效应严重影响了飞行器的升阻比、推进效率和可操纵性。与这个雷诺数范围对应的气动问题较为复杂,特别是涉及到层流分离和分离诱导转捩等这些核心基础科学问题。另一方面,以太阳能动力飞行器为例,这个范围的飞行器往往还面临一些共性问题,即由于飞行速度低,翼载小,并采用轻质大展弦比机翼设计,不仅气动弹性和流固耦合效应不可忽视,而且对大气扰动的运动响应也同常规飞行器截然不同,需要有新的飞行控制策略。

因流速低、气动载荷小和转捩/湍流模型不成熟等因素,使得低雷诺数流动的精细计算和精密测试较为困难,模拟和测量结果分散。所以,飞行器低雷诺数空气动力学仍然是一门富有挑战性空气动力学前沿学科。同时,这个雷诺数范围的空气动力学问题同样广泛存在于民用工业和日常生活中,如:风力发电、风机、风扇、空调等,这方面的研究对于相关产业的增效、节能、降噪有重要的应用价值。

本书作者以飞行器低雷诺数空气动力学及其工程设计中的关键力学问题为主线,在充分调研国内研究进展,尤其是在总结了作者研究团队近十几年来理论研究和各种无人机研发成果的基础上,系统整理成专著。专著涉及低雷诺数流动结构与气动特性;螺旋桨低雷诺数空气动力学;低雷诺数飞行器气动弹性问题;低雷诺数飞行器飞行力学问题;低雷诺数空气动力学数值方法和实验技术等诸多方面,内容丰富、结构完整,紧密结合工程实际。

现有的有关低雷诺数流动的专著研究颗粒、细胞、微生物运动,涉及极低雷诺数的流动范围。这时,粘性效应更加显著,还需关注流体动力学干扰和相关物理、化学、生物现象。迄今,还没有一本系统论述雷诺数范围在 $10^4\sim 10^5$ 飞行器的低雷诺数空气动力学的著作,深信本书的出版可以弥补上述不足,对开展低雷诺数空气动力学基础研究的科研人员、高等院校师生和从事低雷诺数飞行器、流体机械、家用电器等应用研究和工程设计的人员具有重要参考价值。

李家寿

2017年3月

前 言

临近空间低速飞行器和微小型飞行器由于飞行速度低、空气稀薄或是尺寸小、速度低，其飞行雷诺数较常规飞行器低1~2个量级，属于低雷诺数飞行器。由于低雷诺数空气动力学的自身特点，两类飞行器飞行时面临着气动特性恶化和飞行控制两大难题，这两大问题已成为这两类飞行器研制的主要技术瓶颈。21世纪以来，随着高空长航时太阳能无人机、平流层飞艇、升浮一体飞行器等低速临近空间飞行器和微小型无人机成为热点，有关飞行器低雷诺数空气动力学的研究逐渐增多，但目前针对该领域的综合性论著国内外还非常缺乏。特别是我国针对飞行器低雷诺数气动及相关学科交叉问题开展系统研究论述的专著还没有见到。本书的写作目的是根据作者此方面的大量研究工作，论述相关的最新进展和探索，同时结合国内外相关成果，对飞行器低雷诺数空气动力学及相关问题进行了较为系统的阐述和梳理，致力于满足从事低雷诺数飞行器的空气动力学学者和设计师们在该领域的需要，同时为该领域的理论工作者和工程技术人员提供指导和参考。

本书主要分为6章：第1章是绪论，该部分统领全书，论述了低雷诺数流动的主要空气动力学及低雷诺数飞行器相关的多学科交叉问题和挑战，为后5章的展开提供研究背景 and 问题的来源；第2章是低雷诺数空气动力学研究方法，该章着重针对相应的方法和技术开展系统的论述，主要包括数值模拟技术和地面风洞试验技术；第3章是低雷诺数流动结构与气动特性，该部分将详细阐述低雷诺数下气动特性恶化、强非定常非线性效应、来流湍流度和表面粗糙度及蒙皮振动对低雷诺数气动特性的影响等问题，较为系统地介绍了作者在低雷诺数流动结构和气动特性演化规律及作用机理方面的研究成果；第4章是临近空间飞行器螺旋桨技术，该章主要介绍了低雷诺数螺旋桨气动特性及分析方法、螺旋桨气动及宽工况优化设计、高空低雷诺数螺旋桨地面试验验证技术等；第5章为低雷诺数飞行器相关飞行力学特性，以临近空间太阳能飞行器为例讨论这类飞行器特有的飞行力学响应特性、作用机理和抑制技术。第6章为低雷诺数流动相关的气动弹性力学，该部分主要论述低雷诺数气弹相关的非定常气动力和建模技术、大展弦比柔性结构建模与试验技术、柔性结构气动弹性等问题。

本书的每一章内容既自成体系，又统一于飞行器低雷诺数空气动力学的主题，全书各章节相互支撑，较为系统全面地论述了飞行器低雷诺数气动及相关交叉问题。本书着眼于应用，同时适当地给出了相关研究方法的理论基础，并尽可能反映作者关于飞行器低雷诺数空气动力学当前研究工作的最新成果，希望本书有助于读者今后的研究工作。

本书主体是作者在长期针对以临近空间太阳能无人机和微小型无人机为代表的低雷诺数飞行器总体和气动设计及预测分析的研究成果基础上创作而成的。李锋作为该书的第一作者，完成对本书的策划与统稿；李锋、白鹏完成了主要的著作工作。各章作者主要包括：第1章 李锋；第2章 白鹏、刘强；第3章 白鹏、李锋；第4章 李喜乐、李锋；第5章 李锋、叶川；第6章 刘子强。另外，周伟江和纪楚群研究员对全书章节结构和内容进行了认真审查，并提出了大量有价值的宝贵意见；黄浩、刘强、詹慧玲、刘周、朱志斌、李健华、康传明、付志超、陈占军、吕计男、侯英昱、朱剑等为本书提供了很多有价值的素材和资料；刘强对全书公式、图表、文献等进行了整理与标校；李家春院士和陈十一院士为本书做出了客观的评价与推介。在这些同志的共同努力下，本书得以顺利出版，在此统致感谢！

由于作者水平所限，本书难免存在不足之处，请广大读者及时给予指正。

李锋 白鹏

2016年11月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 飞行器低雷诺数空气动力学的范畴和相关特性	1
1.2 低雷诺数空气动力学的主要问题	3
1.2.1 低雷诺数层流分离与转捩	3
1.2.2 低雷诺数气动特性的非线性特征	6
1.2.3 低雷诺数流动的数值模拟和风洞试验	7
1.2.4 低雷诺数流动三维效应	9
1.3 低雷诺数问题带来的挑战	10
1.3.1 低雷诺数效应对飞行器性能的影响	10
1.3.2 低雷诺数气动特性预测精度	11
1.3.3 低雷诺数流动机理、演化规律及低雷诺数效应的有效抑制	11
1.3.4 低雷诺数飞行器伴随的飞行力学响应和气动弹性问题	12
参考文献	14
第 2 章 低雷诺数空气动力学研究方法	16
2.1 低雷诺数气动问题数值模拟技术	17
2.1.1 低雷诺数空气动力学基本方程	18
2.1.2 RANS 数值模拟方法	24
2.1.3 精细化数值模拟方法	41
2.1.4 低雷诺数流动数值算例及散布度分析	45
2.2 低雷诺数风洞试验技术	59
2.2.1 国内外低雷诺数试验设施设备	59
2.2.2 翼型气动力测试技术	64
2.2.3 低雷诺数风洞测力试验结果散布度分析	66
2.2.4 低雷诺数流动显示研究技术	67
参考文献	74

第 3 章 低雷诺数流动结构与气动特性	76
3.1 低雷诺数分离流动基础特性	78
3.2 经典层流分离泡	80
3.2.1 时均化经典层流分离泡	80
3.2.2 雷诺数对经典层流分离泡的影响	86
3.2.3 攻角对经典层流分离泡的影响	86
3.3 后缘层流分离泡	88
3.3.1 时均化后缘层流分离泡	89
3.3.2 后缘层流分离泡的试验验证	91
3.3.3 后缘层流分离泡的非定常特性	95
3.4 翼型低雷诺数气动特性攻角非线性效应	100
3.4.1 翼型低雷诺数气动特性小攻角非线性效应	100
3.4.2 翼型低雷诺数气动特性中到大攻角静态滞回效应	102
3.5 翼型流动结构与气动特性随雷诺数演化规律	105
3.5.1 低雷诺数时均化流动结构与气动特性演化规律	105
3.5.2 非定常分离特性随雷诺数的演化规律	109
3.6 来流湍流度、表面粗糙度对低雷诺数气动特性影响	112
3.6.1 来流湍流度影响	113
3.6.2 表面粗糙度影响	116
3.7 蒙皮振动对翼型低雷诺数流场结构和气动特性影响	121
3.7.1 蒙皮振动对翼型流场结构和气动特性的影响	123
3.7.2 蒙皮振动对流场非定常特性的影响	128
3.7.3 振动频率的影响	130
3.8 低雷诺数三维流动特性	134
3.8.1 翼段低雷诺数流动的三维效应	134
3.8.2 大展弦比机翼低雷诺数气动特性	137
3.8.3 小展弦比机翼低雷诺数气动特性	139
参考文献	143
第 4 章 临近空间飞行器螺旋桨技术	145
4.1 低雷诺数螺旋桨气动特性及分析方法	145
4.1.1 低雷诺数螺旋桨流动结构与气动特性	145
4.1.2 低雷诺数螺旋桨气动特性分析方法	151
4.1.3 高空螺旋桨算例验证	152

4.2	低雷诺数螺旋桨气动设计	154
4.2.1	基于粒子群算法的翼型和桨叶气动优化设计方法	155
4.2.2	螺旋桨气动优化设计	158
4.2.3	临近空间太阳能无人机螺旋桨特性	164
4.3	推进系统多工况匹配技术	168
4.4	高空低雷诺数螺旋桨气动特性试验技术与验证	171
4.4.1	低雷诺数螺旋桨相似理论	172
4.4.2	高空低雷诺数螺旋桨试验方法	174
4.4.3	临近空间太阳能无人机螺旋桨地面试验	177
	参考文献	185
第5章	低雷诺数飞行器相关飞行力学特性	187
5.1	飞行力学方程及假设	187
5.1.1	刚性飞行器动力学及运动学方程	188
5.1.2	运动方程线性化	188
5.1.3	小扰动运动方程组	190
5.2	飞行器质量和气动特征	190
5.2.1	质量特性	190
5.2.2	气动特性	192
5.3	气动导数计算方法及机理分析	193
5.3.1	俯仰动导数	193
5.3.2	滚转动导数	194
5.3.3	航向动导数	196
5.3.4	计算公式验证	198
5.3.5	动导数机理分析	198
5.4	临近空间太阳能飞行器在静止大气中的稳定性	199
5.4.1	纵向稳定性	199
5.4.2	横航向稳定性	202
5.5	临近空间太阳能飞行器在风场中的稳定性	206
5.5.1	考虑风场影响的横航向运动方程	206
5.5.2	定常水平风和垂直风对横航向稳定性的影响	210
5.5.3	横航向运动参数对风场扰动的响应	213
5.6	飞行控制技术	218
5.6.1	纵向飞行控制	218

5.6.2 横航向飞行控制	219
5.6.3 在风场中的横航向控制策略	220
参考文献	225
第6章 低雷诺数流动相关的气动弹性力学	226
6.1 气动弹性力学的发展和挑战	227
6.1.1 低雷诺数飞行器气动弹性的特征	227
6.1.2 非定常气动力	227
6.1.3 柔性结构动力学	229
6.1.4 气动弹性耦合	230
6.2 低雷诺数非定常气动力	231
6.2.1 非定常气动力的一般特性	231
6.2.2 非定常数值计算技术	232
6.2.3 低雷诺数非定常气动力模型方法	234
6.3 柔性结构	237
6.3.1 柔性结构的描述方法	237
6.3.2 本征梁模型参数	239
6.3.3 柔性梁结构特性和模型验证	241
6.4 低雷诺数柔性结构气动弹性技术	242
6.4.1 颤振分析和预示	242
6.4.2 突风载荷及响应分析	244
6.4.3 气动弹性与飞行力学耦合	246
6.4.4 主动气动弹性技术	250
参考文献	253

第 1 章 绪 论

雷诺数是飞行的一个十分重要的参数, 常规飞行器一般飞行雷诺数在 10^6 量级或更高。针对低速飞行器, 若在空中及临近空间大气密度较低的环境下飞行, 如临近空间太阳能飞行器和飞艇^[1], 或是本身尺寸较小, 如微小型飞行器等^[2-3], 则飞行雷诺数将处于 $10^4 \sim 10^5$ 量级, 与之相应的螺旋桨推进器也将面临相同或更低的雷诺数范围。航空领域将飞行器低雷诺数范围定义在 $10^4 \sim 10^5$ 量级或更低。从雷诺数的理论定义上可见, 在低雷诺数范围, 气体惯性力同黏性力之比减小, 黏性力占比将增大; 研究和飞行试验发现, 飞行器在低雷诺数下飞行, 升阻比大幅降低, 相应螺旋桨效率也大幅下降; 其气动特性还表现出非定常非线性以及流动结构稳定性差等现象。同低雷诺数飞行器紧密相关的另一个共性问题是非定常非线性以及流动结构稳定性差等现象。同低雷诺数飞行器紧密相关的另一个共性问题是低翼载, 这一特点导致这类飞行器运动响应和气动弹性同常规飞行器存在很大不同。由上分析, 低雷诺数飞行器面临的气动特性恶化和飞行控制两个主要问题, 已成为这类飞行器研制的主要技术瓶颈^[1]。虽然低雷诺数流动在空气动力学领域是一个分支, 但由于以往在低雷诺数环境下飞行的飞行器较少, 工程应用需求不足, 加之低雷诺数流动较常规雷诺数流动复杂, 所以国内外针对飞行器低雷诺数空气动力学方面的研究相对较少。目前低雷诺数空气动力学领域的理论基础是霍顿 (Horton) 等人的经典层流分离泡理论, 其核心思想是由于层流抗逆压梯度能力较弱, 壁面上层流边界层发生层流分离, 之后通过转捩引入能量发生再附, 形成较大尺寸的层流分离泡, 从而引起气动特性的较大改变。Horton 本人提出的层流分离主要是针对短泡, 后来一些学者又将其扩展至长泡, 本书将其统称为经典层流分离泡理论。相应的分离泡模型也称之为经典层流分离泡。通过作者研究团队的长期研究发现, 层流分离泡物理上是不存在的, 它是非定常流动时均化的结果; 另外, 低雷诺数流动还存在另一种新的结构, 即时均化的后缘分离泡, 这一新的流动结构同经典流动结构有着明显差异, 因此这一经典理论尚存在一些地方需要完善和深入探讨。

进入 21 世纪, 随着临近空间低速飞行器和微小型无人机成为热点, 对飞行器低雷诺数空气动力学研究逐渐增多, 但目前尚未有此领域的综合性论著。本书主要根据作者在此方面的大量研究工作, 论述相关的最新进展和探索, 同时结合国内外相关成果, 对飞行器低雷诺数空气动力学及相关问题进行系统的阐述, 为从事该领域研究的学者和工程技术人员提供参考。

1.1 飞行器低雷诺数空气动力学的范畴和相关特性

首先什么是低雷诺数?

雷诺数表示流体微团所受的惯性力与黏性力的比值, 可表示为

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \propto \frac{\text{惯性力}}{\text{黏性力}} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——来流密度；
 V ——来流速度；
 L ——飞行器特征尺度；
 μ ——流体黏性系数。

低雷诺数流动是流体力学的一个分支学科，且于近 30 年来发展成为一个活跃的分支领域。它一般指特征尺寸小、速度缓慢或者环境密度低的流动。

低雷诺数并不是一个唯一确定的概念，不同研究领域，雷诺数高低区分大不相同。对于在化工、环境、采矿、物理化学、生物力学、地球物理和气象学中的某些问题，常常需要讨论微小粒子、液滴或气泡在黏性流体中的缓慢运动，其关心的雷诺数范畴为 1 附近，甚至远小于 1 而接近于 0，相应的流动问题称为欧辛（Oseen）流动和斯托克斯（Stokes）流动。此类问题具有专门的研究方法，Happel 和 Brenner 的专著^[4]很好总结了此类问题在 20 世纪 60 年代中期以前的工作。严宗毅教授则在其著作^[5]中以此类低雷诺数问题在 20 世纪 70 年代之后发展的四种新方法为重点，系统介绍了此类低雷诺数流动的基本理论、精确解和各种半解析半数值近似解法。

对于航空航天而言，常规飞行器雷诺数范围基本都在 10^6 量级以上，其定义的低雷诺数范围与 Happel、Brenner^[4] 和严宗毅等^[5] 的定义不同。Lissaman^[6] 曾在 1983 年撰文指出飞行器雷诺数范围在 $10^4 \sim 10^5$ 量级为低雷诺数。在此范围内由于黏性力所占的比重增加，飞行器气动效率急剧恶化，流动非线性效应显著。临近空间低速飞行器和微小型飞行器的飞行雷诺数就在这一范畴。对临近空间低速飞行器来说，其主翼、安定面的雷诺数范围大致为 $10^4 \sim 10^5$ 量级，推进系统螺旋桨雷诺数范围也基本如此；对于微小型飞行器而言，雷诺数也在这一范围，甚至更低。与此同时，低雷诺数飞行器通常翼载较小，比常规飞行器小 1~2 个量级，见图 1-1 飞行器雷诺数和翼载分布示意图。飞行器翼载低一般也具有轻质结构的特点，这种质量分布特点同气动特性耦合会使相关飞行力学和流固耦合问题变得十分复杂。



图 1-1 飞行器雷诺数和翼载分布示意图

1.2 低雷诺数空气动力学的主要问题

在低雷诺数范畴，空气黏性效应显著，升阻特性急剧恶化，气动特性和流动结构表现出与中高雷诺数显著不同的特点，明显的差异主要体现在层流分离和分离诱导转捩、气动特性的非线性、数值模拟和风洞试验精准度低、流动的三维效应四个方面。

1.2.1 低雷诺数层流分离与转捩

层流分离和转捩对低雷诺数气动特性和流场结构演化至关重要。正是由于它们的存在造成翼型和机翼阻力系数快速增大，升力系数和升阻比急剧下降，导致飞行器升阻特性和螺旋桨推进效率大幅降低。同时，由于操纵面一般布置在机翼后缘，处于层流分离影响显著的区域，低雷诺数流动对于舵面的气动特性和操纵效率也会产生很大影响。

低雷诺数流动机理研究的奠基性和开创性工作可以追溯到 20 世纪 60 年代 Horton 等人提出的经典层流分离泡模型^[7-8]，他们首次系统地提出层流分离泡理论。该理论认为低雷诺数情况下层流边界层在逆压梯度的作用下产生分离离开物面，层流流动在空间发生转捩演化成为湍流，将外层高能量的气流引入边界层从而产生再附，形成层流分离泡，如图 1-2 所示，并认为层流分离泡再附点后的边界层是湍流边界层。层流分离泡按位置和长度可分为短泡和长泡，短泡发生在翼型前缘附近，长度为弦长的百分之几；长泡发生在翼型中后部，长度占翼型弦长的百分之十几至百分之几十。并指出正是由于层流分离泡的存在造成光滑机翼低雷诺数气动特性急剧变坏，升力系数快速下降，阻力系数迅速增大，最大升阻比急剧降低。

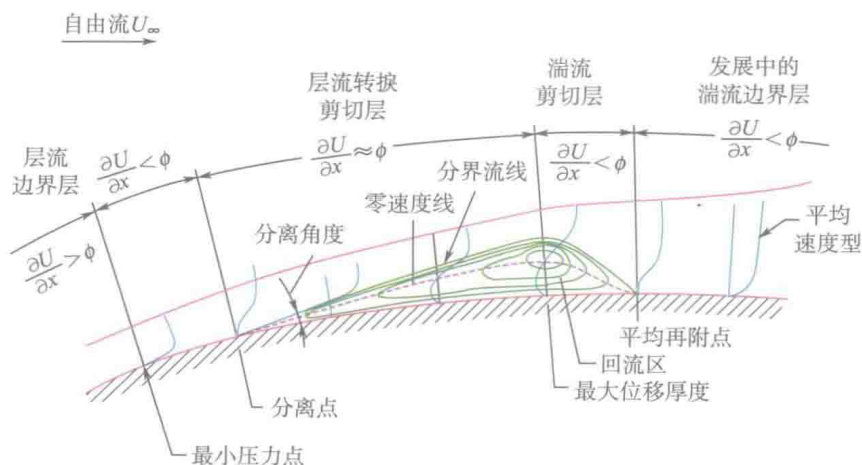


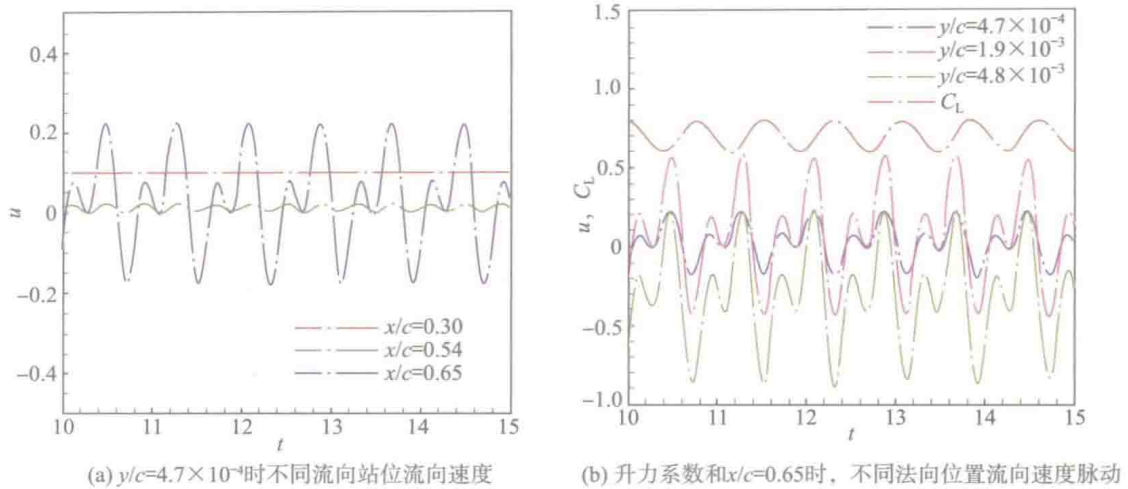
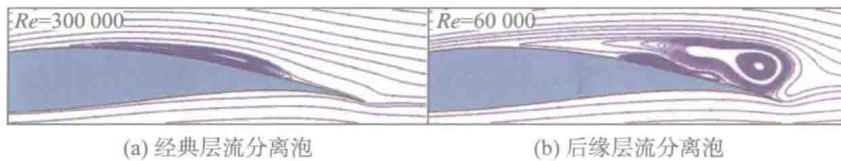
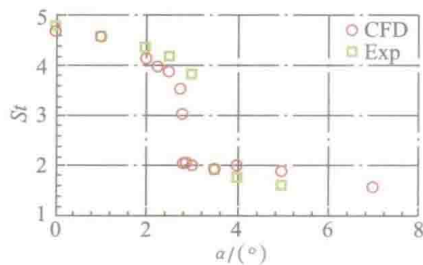
图 1-2 经典低雷诺数层流分离泡结构示意图

随后的风洞试验^[9]和数值模拟研究^[10]都表明层流分离泡存在很强的非定常和非线性特性，图 1-3 是 CFD 模拟翼型不同弦向位置 (x/c) 和距物面不同法向距离 (y/c) 点处流场流向速度 u 和翼型升力系数 C_L 随时间的变化。从图中可见在分离点之前 ($x/c = 0.3$)，

流动基本为定常，而分离点之后位置 ($x/c = 0.54, 0.65$) 流向速度分量产生周期性脉动。速度脉动幅值会随着弦向位置后移和距物面法向距离增大而增加，同时升力系数也呈现周期性变化的规律。同样试验观测所获得再附点区域往往存在很强的压力脉动。通过国内外大量的风洞试验和 CFD 获得的结果显示，分离区存在一系列脱落的分离旋涡，证实低雷诺数流动实质上是一种非定常流动。对该非定常流场进行时间平均可以获得明显的层流分离泡流场结构和压力分布形式，这同 Horton 等人提出的经典层流分离泡理论一致，但对层流分离泡存在很强的非定常和非线性特性的认知，显然是对经典层流分离泡理论的进一步深化。本书作者团队在研究低雷诺数流动翼型小攻角非线性特性时发现了一种新的流动分离结构，即后缘层流分离泡结构^[11]，见图 1-4 经典层流分离泡同后缘分离泡对比。这一分离结构同经典层流分离泡存在显著的不同，主要区别表现在两方面：首先，时均化后缘分离泡始终停留在后缘上方，不随攻角变化，同时不存在像经典层流分离泡的再附点；第二，对应时均化后缘分离泡的非定常结构不同于经典层流分离泡，它的非定常区域较小，只是在后缘附近呈现非定常，而经典层流分离泡对应的非定常区域较大。基于这一新发现，通过大量的研究，表明这种时均化后缘层流分离泡具有普遍性，广泛存在于低雷诺数流场结构之中。更深入系统的研究结果表明，低雷诺数条件下这两种层流分离泡结构随攻角和雷诺数的变化发生演化，后缘层流分离泡的出现使翼型的升阻特性进一步恶化，简言之，经典层流分离泡主要使阻力增加，而后缘层流分离泡使阻力增加的同时升力大幅下降。图 1-4 表明，随雷诺数的下降，经典层流分离泡演化为后缘层流分离泡。同样，相同雷诺数下随攻角的变化，经典层流分离泡与后缘层流分离泡之间也会发生演化（见第 3 章论述）。两种不同流动结构之间的演化除导致升阻力特性差异较大外，也使得演化前后流场的非定常特性差别十分明显。图 1-5 为非定常升力系数的斯特劳哈尔数。从图中可见，演化前流动结构为后缘分离泡，在某一攻角突然演化为经典层流分离泡，流场的脉动频率突然降低。后缘层流分离泡的存在及同经典层流分离泡之间的演化这一新发现很容易解释低雷诺数流动的很多特殊现象，如小攻角升力系数的非线性和升力及阻力恶化对应的攻角及雷诺数不同等。关于这一发现的相关研究内容，经典理论未曾论述，这可以说是对经典理论的拓展和完善。

在科学技术的发展史上，许多理论都经历了一个不断完善和发展的过程，低雷诺数流动理论上的进步也正在经历这一过程。低雷诺数经典层流分离泡理论在低雷诺数流动领域无疑起到了奠基性的作用，其时均层流分离泡概念仍是指导低雷诺数流动研究的基础和工具。然而随着研究的不断深入，经典理论也需拓展和完善。实际上低雷诺数流动是一种非定常流动，不存在经典理论描述的层流分离泡，它是非定常流动时均化的结果；低雷诺数流场存在两种不同特征的流动分离，以时均化概念则表征为经典层流分离泡和后缘层流分离泡，这两种不同的分离结构会随攻角和雷诺数变化而相互演化。层流分离流动非定常特性的发现，时均化后缘层流分离泡概念的提出；以及两种分离结构之间演化对气动特性影响规律的研究正是对经典层流分离泡理论进一步的完善。

层流转捩效应研究方面，前人已经发展了不同的数值模拟和试验研究方法，同时已经

图 1-3 $Re = 6.0 \times 10^4$, $\alpha = 4^\circ$ 翼型上表面不同位置流向速度及升力系数随时间脉动曲线图 1-4 攻角 4° 条件下, 不同雷诺数时均化流动结构图 1-5 非定常升力系数斯特劳哈尔数 (St) 随攻角变化情况

开展了大量的研究工作, 但对低雷诺数流动的转捩机制并没有完全认识清楚。一般来说, 转捩机制主要可以分为自然转捩、旁路 (bypass) 转捩和分离诱导转捩三种类型, 人们往往将低雷诺数的转捩机制归结为分离诱导转捩。由于层流分离和分离诱导转捩并存及相互影响使得低雷诺数转捩流动的机理研究非常复杂, 截至目前, 大量的文献都仅是提出分离诱导转捩的术语或概念, 真正对低雷诺数条件下的转捩机制开展机理性研究的工作还基本空缺, 但正是由于这部分机理研究工作的不足, 造成低雷诺数流动转捩位置难以准确预测。

近期关于低雷诺数流动结构稳定性的研究工作已逐步展开, Zhou 等^[12]采用高阶谱差分方法, 计算了 SD7003 翼型在中等攻角时的绕流。他们的研究发现, 边界层存在的低频振荡是导致流动失稳的一个主要因素。这种低频振荡不稳定性增长不同于平行流的稳定

性理论，也不同于前缘的感受性理论，具有比 $T-S$ 波更高的增长率。这部分的工作刚刚开展不久，不够系统，但对于研究低雷诺数层流分离和转换流动的作用机制很有意义。

1.2.2 低雷诺数气动特性的非线性特征

在低雷诺数情况下，对称翼型在 0° 攻角附近，升力线斜率不再保持 2π ，升力系数随攻角变化曲线会出现平台甚至反向，可能造成小攻角气动特性的非线性从而引起操纵失效。翼型在中等至大攻角范围，气动力系数出现与层流分离泡发展密切相关的“静态滞回”效应（如图 1-6 所示）。与翼型“动态滞回”为飞行器提供更高失速攻角及升力和力矩系数不同，“静态滞回”效应会影响翼型的最大升力系数和最大升阻比，并使之在很大的范围内变化，会造成低雷诺数飞行器机动能力和失速改出的困难及延迟恢复。

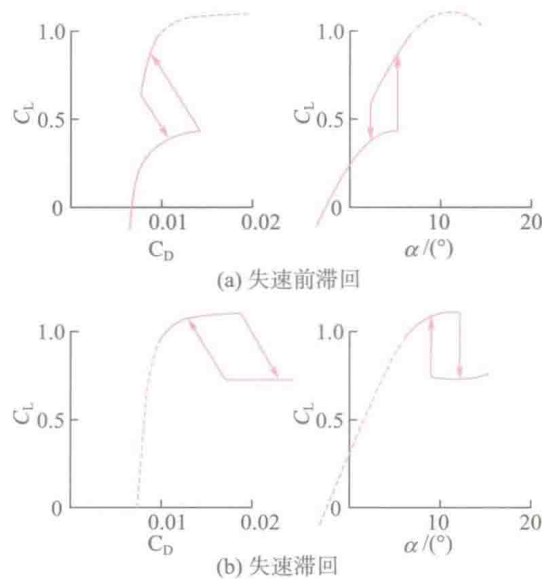


图 1-6 静态滞回效应

小攻角非线性效应的研究工作开展得较晚，2006 年后，白鹏等^[11,13]采用非定常数值模拟和水洞 PIV 流动显示试验相结合的研究手段，以 SD8020 对称翼型为对象，较为系统地研究了翼型低雷诺数中等攻角以下的时均化和非定常层流分离效应与气动力特性，提出了不同于经典的“长层流分离泡”（LLSB, Long Laminar Separation Bubble）模型的时均化“后缘层流分离泡”（TLSB, Trailing-edge Laminar Separation Bubble）模型。其外部形态、内部结构和演化规律均与经典层流分离泡模型存在显著差异。后缘层流分离泡外形为棒槌形，显著特征为随着攻角增加，分离点前移、分离区变大，主涡的中心位置始终停留在翼型后缘点上方，不存在分离再附点，其层流分离时均化结果使翼型等效弯度发生改变，带来了升力随攻角增加的非线性。正是由于上述两类层流分离涡结构之间的演化造成了对称翼型低雷诺数小攻角升力系数非线性效应，细致研究表明其非定常气动特性和压力分布也存在显著差异。2013 年，日本的 Kojima 等^[14]采用 LES 大涡模拟方法模拟了 $Re = 2.3 \times 10^4$ 下的 NACA0012 和 NACA0002 翼型流动并进行了分析，计算显示较厚的