

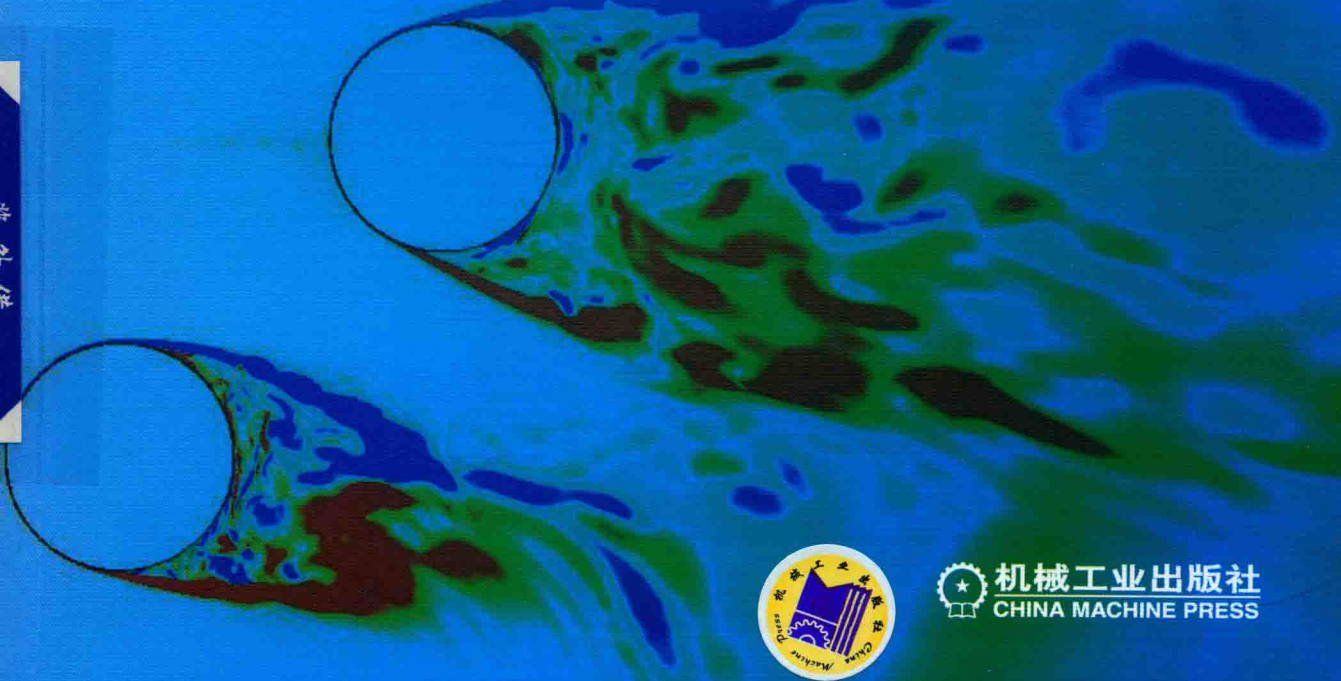
翻译版

圆柱绕流 I ——基础

[塞尔维亚] M.M. 斯特兰科维奇(M.M. Zdravkovich) 著

马文勇 刘福军 刘庆宽 胡波 译

Flow Around Circular Cylinders
Vol 1: Fundamentals



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

时代教育·国外高校优秀教材精选

圆柱绕流 I —— 基础

(翻译版)

[塞尔维亚] M. M. 斯特兰科维奇 (M. M. Zdravkovich) 著
马文勇 刘福军 刘庆宽 胡波 译



机械工业出版社

本书译自 M. M. 斯特兰科维奇教授所著《FLOW AROUND CIRCULAR CYLINDERS》，该著作最大的特点就是通过对流体绕过圆柱现象的广泛讨论，在流体动力学和风/海洋工程之间架起了一座桥梁。该著作共有两卷，本书为该著作的第 I 卷：基础。

本书主要介绍了流体绕过圆形断面的现象及发生机理、基本概念、理论模型及其解。本书内容涉及各类流体（如牛顿流、非牛顿流、压缩流等）在不同流速下（雷诺数范围从 0 到过临界雷诺数区）绕圆柱后出现的流场、压力分布、噪声、空化等多种现象及机理。

本书不仅可以作为风工程、水利工程、机械工程等专业本科生、研究生流体力学课程教材，也可以作为学生、教师、科研人员和工程技术人员参考书。另外，阅读本书您一定能感受到 M. M. 斯特兰科维奇教授对科学的热爱，以及这个充满神秘色彩且看似简单的圆柱绕流问题所带来的无穷乐趣。

FLOW AROUND CIRCULAR CYLINDERS VOL 1: FUNDAMENTALS /
By M. M. ZDRAVKOVICH/ ISBN: 9780198563969

© M. M. ZDRAVKOVICH, 1997 arranged through Oxford University Press
with Andrew Nurnberg Associates International Limited.

This title is published in China by China Machine Press with license from Oxford University Press. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Oxford University Press 独家授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-7860 号。

图书在版编目（CIP）数据

圆柱绕流：翻译版. I, 基础/(塞尔) M. M. 斯特兰科维奇 (M. M. Zdravkovich) 著; 马文勇等译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12
(时代教育·国外高校优秀教材精选)

书名原文: Flow Around Circular Cylinders Vol 1: Fundamentals
ISBN 978-7-111-58665-4

I. ①圆… II. ①M… ②马… III. ①流体动力学-高等学校-教材
IV. ①O351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 304194 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李 帅 责任编辑: 李 帅 臧程程

责任校对: 肖 琳 封面设计: 张 静

责任印制: 常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 31.5 印张 · 771 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58665-4

定价: 99.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

译者序

圆形可能是自然界中存在最广泛的一种形状，看看我们自己的身体，细至头发，粗至腰部，内至血管，外至手指，都是圆形截面。大自然的选择一定有其深刻的道理，实际上现代科技也偏好圆形，圆柱是流体力学、机械工程、土木工程、航海工程、航空与航天领域等领域中应用最广的基本形状之一。在对风工程领域细长结构风致振动的研究中，我们认为圆柱绕流的研究在流体力学和土木工程之间架起了一座坚固而宽阔的桥梁。

圆柱绕流也许是流体力学领域研究最广泛的课题，该研究基本上可以追溯到现代科学研究方法的建立之时，几百年过去了，如果参加最近召开的国际流体力学会议，你仍然可能看到圆柱绕流的最新研究成果。《圆柱绕流》这本书的作者 M. M. 斯特兰科维奇给出了一个完美的比喻“圆柱绕流的研究就好像在拼一个复杂而美妙的拼图，虽然已经存在了大量离散的块，但是拼图仍然没有完成，而且仍然有新的块被发现。”我们深信，每一个该领域的研究人员都很想看到这个拼图的全貌，或者至少可以看到一个完整的局部区域，对此我们也充满了期待。

很遗憾，由于各种原因，我国的科研人员并没有从一开始就加入到这个拼图游戏中。而且由于该领域的已有的研究非常之广、非常之深入，光是了解已有的研究成果就为该领域的研究设置了一个很高的门槛。《圆柱绕流 I——基础（翻译版）》一书的出现有效地降低了这个门槛，它几乎总结了 1997 年以前所有有记录的关于圆柱绕流的研究成果，已有的拼图块被有序的归类和拼接，让我们可以用最短的时间一睹这个拼图的宏伟和壮观。即使如此，阅读一本近百万字的英文著作对很多人来说仍然是一个不小的挑战，更何况其中包含大量的图表和公式。当我们下定决心要理清圆柱绕流的已有研究时，突然觉得也许多花点时间将它翻译成中文可能会帮助到更多像我们这样的研究人员，于是 2012 年 9 月份我们开始着手翻译本书。

翻译这样一本著作远比我们想象中的难度大许多：第一，涉及的知识面很广，有很多内容必须求助于他人的帮助，他们中的一些后来直接加入了本书的翻译团队；第二，书中引用的很多成果都是在 50 年甚至 100 年以前，找到原文进行对比需要花费大量的时间，而且当时印刷技术限制了图形的清晰度；第三，书中的参考文献包含了大量非英语的文献，也给我们造成了很大的困难。5 年过去了，我们完成了全书的翻译。在此，衷心的期望您能感受到我们对圆柱绕流研究的热情，如果本书能为您了解圆柱绕流的已有研究成果节约一点时间，将是我们的荣幸，欢迎您加入到这个拼图游戏中来。

限于自身水平，书中难免有翻译错漏、表达不及的地方，甚至谬误之处也在所难免，恳请各位专家和读者朋友们不吝赐教。欢迎给我们发邮件进行交流：mawenyong@126.com，期待您的邮件。

译者

2017 年 9 月

前 言

本书旨在为航空航天、土木工程、水利工程、输电线路工程、机械工程、核工程、海岸工程和风工程的研究人员、工程师、教学人员及学生提供指导，同时也可作为以流体力学为研究对象的应用数学和物理学从业人员的参考读物。

本书最显著的特点是专门讨论最经典的圆形断面钝体结构。由于这类结构引起的流动形态复杂，研究人员针对该问题已经进行了大量的早期研究，同时考虑到圆柱形结构在工程中应用广泛，因此我觉得研究人员对该类结构的深入研究很有必要。

《圆柱绕流》共分为两卷。本书为第Ⅰ卷，主要讨论圆形结构流体动力学的基础，分为A、B、C三部分；第Ⅱ卷将讨论其应用，分为D、E、F三部分。

第Ⅰ卷的主要内容包括：

(A) 全雷诺数范围内名义二维圆柱周围的无扰动流。

(B) 几种理论模型，如：自由流线模型、涡模型、涡面模型和其他不太常用的混合模型。

(C) 自由流影响，如湍流度、剪切、压缩、噪声、空化现象和非牛顿流。

第Ⅱ卷的主要内容包括：

(D) 几何参数的影响，如表面粗糙度、长细比、锥度、阻塞率、有限长度、倾斜、旋转、近距离壁面、两圆柱、多圆柱和圆柱阵列等。

(E) 非定常自由流，如加速流、减速流、回旋流、振荡流、波浪、波浪和涌流的混合流以及绕流。

(F) 流体诱发振动，自由振动和强迫振动，同步振荡，影响和控制参数，抑振措施，多圆柱干扰效应，圆柱阵列效应，理论模型和椭圆振荡。

本书可以比作某种尚未完成的特殊拼图游戏，由成千上万个单独的“块”组成，但是目前这些“块”并没有被很好地拼接起来。由于流体力学本身非常复杂，常常需要更多的研究来形成新的“块”进一步完成拼图。这种比喻也许可以帮助读者更好地理解本书的内容。

本书包含了我一生学习和研究圆柱绕流的各种问题的成果。起初我并没有刻意地要写一本巨著，但是由于钝体结构绕流领域一直有新的发现，因此我觉得写一本可以广泛应用的著作是有必要的，而本书就是在这种长时间的研究工作中诞生的。书中的内容主要集中在各种现象的物理解释上，每一种现象的描述都包含其发生的可能原因。每一个工作都尽可能涉及流体的各个方面，因此这是一本综合性的著作。

为了更好地推进目前的研究工作，很多第二次世界大战前的里程碑式的研究工作也包含在本书中。如今论文和信息的发表速度已经远远超过了工程师和科学家的吸收消化速度，因此本书尝试为读者提供一个节约时间的概述性的指南。

书中给出了重要内容的参考文献以便于读者对本书内容的深入研究，同时为了方便对大量参考文献进行处理，本书将参考文献分为四类：

- (i) 书籍，包括全集（部分相关内容）。
- (ii) 综述——高度相关，对入门阅读非常有用。
- (iii) 期刊论文（容易获得）。
- (iv) 会议论文、报告等（难获得）。

欢迎各位读者对本书提出评论和质疑，我将尽力回答，也非常希望您将您认为有价值的研究报告、论文等出版物发送给我。

最后，我衷心地希望您在阅读本书的过程中能感受到我对该研究的热情和奉献。

M. M. 斯特兰科维奇
英国兰开夏郡索尔福德市
1994 年 9 月 25 日

致 谢

感谢我的很多同行和朋友与我分享了他们的观点，并且在很多方面提出了非常宝贵的建议。有些人（下画线标示出）阅读了本书的一章或者多章并调整了我的一些观点。我衷心地感激他们抽出自己宝贵的时间为本书做出的评论以及提出的中肯批评。很遗憾，限于篇幅这里无法列出在过去这些年里以各种方式帮助过我的所有人，我真诚地感谢如下各位：

Elmar ACHENBACH, Peter BEARMAN, Eberhard BERGER, the late Richard BISHOP, Bob BLEVINS, Peter BRADSHAW, Peter BUBLITZ, Guido BURESTI, Brian CANTWELL, John CHAPLIN, Shoei CHEN, Yuan CHEN, Madeleine COUTANCEAU, Charley DALTON, Helmut ECKELMANN, Cesar FARELL, Dietrich GERICH, Jack GERRARD, Mike GRAHAM, Bill GREEN, the late Owen GRIFFIN, Francis HAMA, Hiroyuki HONJI, Julian HUNT, Fazle HUSSAIN, Tamotsu IGARASHI, Roger KING, Masaru KIYA, the late Leslie KOVASZNAY, the late Dietrich KÜCHEMANN, Sir James LIGHTHILL, Jim LIVESEY, the late Lev LOYTSANSKI, Austin MAIR, David MAULL, Bill MELBOURNE, Mark MORKOVIN, the late Yasuharu NAKAMURA, Eduard NAUDASCHER, Atsushi OKAJIMA, the late Paul OWEN, Michael PAIDOUSSIS, Geoff PARKINSON, Herbert PEARCEY, Don ROCKWELL, Anatol ROSHKO, Hans RUSCHE-WEYH, Dirse SALLET, Turgut SARP KAYA, the late Christofer SCRUTON, Peter STANSBY, Peter SUTTON, Sadatoshi TANEDA, the late Konstantin VORONETZ, Dave WEAVER, Henri WERLÉ, the late Rudolf WILLE, and Charles WILLIAMSON.

本书中大量的插图已经得到了如下期刊的使用授权：

The abundance of figures in this book is due to the permission granted by the following journals:

Acoustica, Advances in Applied Mechanics, Aeronautical Quarterly (ceased), Aeronautical Research Council (British) Reports and Memoranda, AGARDograph, AIAA Journal, American Institute of Chemical Engineers, American Society of Civil Engineers Proceedings: Journal of Engineering Mechanics Division, Journal of Hydraulics Division and Journal of Structural Division, American Society of Mechanical Engineers Transactions: Journal of Basic Engineering and Journal of Fluids Engineering, Annual Review of Fluid Mechanics, Australian Journal of Scientific Research, Bulletin Japan Society of Mechanical Engineers (now JSME International Journal), Comptes Rendus Academie des Sciences, (Paris), Experiments in Fluids, Fluid Dynamics Research, Fluid Mechanics Soviet Research, Forschung aus dem Gebiete Ingenieurwesens, Ingenieur Archiv, International Chemical Engineering, International Journal of Heat and Mass Transfer, Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Journal of Acoustic So-

ciety of America, Journal of Aeronautical Sciences (ceased), Journal of Aircraft, Journal of Applied Physics, Journal of Fluid Mechanics, Journal of Fluids and Structures, Journal de Mecanique, Journal of Mechanical Engineering Sciences, Journal of Physical Society of Japan, Journal of the Royal Aeronautical Society, Journal of Sound and Vibration, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Luftfahrtforschung (ceased), NACA and NASA Technical Notes and Reports, Philosophical Magazine, Philosophical Transactions A, Physics of Fluids, Physikalische Zeitschrift, Proceedings of Cambridge Philosophical Society, Proceedings of Royal Society A, Progress in Aeronautical and (subsequently) Aerospace Sciences, Recherche Aerospatiale, Revues Francaise de Mecanique, Wärme und Stoffübertragung, Weather, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, and Zeitschrift für Flugwissenschaften und Luftfahrtforschung.

科学是不分语言和国界的，本书将五种语言写成的相关文章压缩成了一种语言并融汇在了同一本书里。

最后，感谢数十位打字员在过去数年里的多次输入工作，以及索尔福德大学的 S. G. Sajjadi 博士完成了最终版的相关工作。

M. M. 斯特兰科维奇

目 录

译者序

前言

致谢

第 1 章 基本概念 1

- 1.1 扰流区域 1
- 1.2 扰流区域中的转换 2
- 1.3 控制和影响参数 3
- 1.4 无扰动流形态 4
- 1.5 层流 L 4
- 1.6 尾流转换 TrW 7
- 1.7 剪切层转换 TrSL 或者亚临界状态 7
- 1.8 边界层转换 TrBL 或者临界状态 9
- 1.9 完全发展的湍流状态 T 10
- 1.10 流体动力的变化 10

第 2 章 定常层流尾流 13

- 2.1 蠕动流 13
- 2.2 蠕动流中的圆柱风压分布 14
- 2.3 蠕动流中的黏性阻力 15
- 2.4 分离的形成与发展 16
- 2.5 L2 流域的风压分布 17
- 2.6 封闭近尾流的流体结构 18
- 2.7 尾流的几何形状 19
- 2.8 近尾流区域外的速度场 21

第 3 章 周期层流 23

- 3.1 封闭近尾流的不稳定性 23
- 3.2 不稳定尾迹的激发和抑制 24
- 3.3 尾迹卷起的早期形态 26
- 3.4 卡门涡街 27
- 3.5 涡街的展向结构 30
- 3.6 周期尾流速度的波动特性 33
- 3.7 旋涡强度 37
- 3.8 尾流旋涡的排列 40
- 3.9 旋涡脱落频率; 斯托罗哈数 43
- 3.10 $St-Re$ 关系的争议 44
- 3.11 通用的 $St-Re$ 关系 45

3.12 旋涡脱落模式间的相互作用 47

3.13 压力、摩擦力和阻力 49

3.14 远尾流中的第二涡街 52

3.15 第二涡街的跨向结构 54

第 4 章 尾迹转换状态 56

- 4.1 下游和上游尾迹转换 56
- 4.2 层流涡线的扭曲-“手指” 56
- 4.3 低频不规则性 58
- 4.4 旋涡脱落频率变化 58
- 4.5 两种涡脱落模式 59
- 4.6 两种涡脱落模式的叠加 60
- 4.7 旋涡到湍流的转换 62
- 4.8 压强、表面摩擦力、分离和阻力 63
- 4.9 抑制转换 66

第 5 章 剪切层转换 67

- 5.1 TrSL1 或者低亚临界区 67
- 5.2 TrSL2 或者中亚临界区 71
- 5.3 TrSL3 或上亚临界区 79
- 5.4 远尾流 99

第 6 章 边界层转换 115

- 6.1 转换与分离的耦合 115
- 6.2 平均压力分布的变化 116
- 6.3 边界层的发展 118
- 6.4 预临界或 TrBL0 区域 119
- 6.5 单分离泡或 TrBL1 区域 122
- 6.6 两分离泡或 TrBL2 区域 125
- 6.7 超临界或 TrBL3 区域 127
- 6.8 平均压力和阻力系数 128
- 6.9 后临界或 TrBL4 区域 131
- 6.10 平均和脉动风压 134
- 6.11 平均和脉动力 136
- 6.12 表面摩擦力 138
- 6.13 分离和再附 139
- 6.14 逆向压力恢复 140

第7章 全湍流状态	143	10.12 黏性趋于零时的流动	229
7.1 预备知识和 T1 流域	143	10.13 湍流扩散的模拟	231
7.2 扰动流动中的三维圆柱	143	第11章 涡模型及其稳定性	233
7.3 极限或者 T2 流域 ($Re \rightarrow \infty$)	145	11.1 无黏涡模型	233
A. 参考文献	147	11.2 点涡的黏性扩散	234
书籍 (B)	149	11.3 任意初始速度剖面	236
综述 (R)	150	11.4 涡量扩散的通解	239
期刊论文 (J)	153	11.5 点涡对	241
会议论文、报告等 (P)	175	11.6 点涡列	243
第8章 N-S 方程的解	183	11.7 双列点涡	244
8.1 Navier-Stokes 方程	183	11.8 半无限长点涡街	246
8.2 Hele-Shaw 流动	184	11.9 Kármán 的稳定性准则	246
8.3 Oseen 近似方程	186	11.10 点涡街的不稳定	248
8.4 Lamb 解的渐进特性	187	11.11 黏性涡街的不稳定性	250
8.5 Oseen 近似的周期性解	190	11.12 绝对不稳定和对流不稳定	252
8.6 Navier-Stokes 方程的数值解	192	11.13 Hooker 的部分黏性涡街	253
8.7 Navier-Stokes 方程的计算解	196	11.14 涡耗散效应	256
8.8 定常流动数值计算	196	第12章 涡街模型	257
8.9 “模拟的”定常流动	198	12.1 涡街的结构	257
8.10 非定常流动数值模拟	200	12.2 涡街的卷曲	257
8.11 Oseen 近似应用于尾迹远场	203	12.3 单涡面的离散涡模拟	259
第9章 边界层近似	205	12.4 两个涡面的离散涡模拟	261
9.1 Prandtl 的薄边界层概念	205	12.5 涡量的明显损失	263
9.2 Von Mises 变换	206	12.6 Gerrard 的离散涡面模型	265
9.3 Hiemenz 解	209	12.7 离散涡的进一步模拟	266
9.4 Thom 的近似方法	211	12.8 Sarpkaya 的离散涡模型	269
9.5 Bairstow 的计算方法	212	第13章 其他模型	272
9.6 进一步的计算	213	13.1 引言	272
9.7 Schlichting 的远尾迹理论	213	13.2 通用斯托罗哈数	272
第10章 自由流线模型	215	13.3 Shaw 的声学模型	278
10.1 由间断面围成的死水区	215	13.4 Birkhoff 的涡街模型	279
10.2 自由流线理论	215	13.5 Ackeret 的温度恢复理论	280
10.3 Brodetsky 的近似变换	216	13.6 涡街中的动量平衡	283
10.4 分离点的变化	217	13.7 Kronauer 的最小阻力模型	285
10.5 基准压力的修正	218	B. 参考文献	289
10.6 自由流线速度变化	220	书籍 (B)	289
10.7 Mimura 对测量压力的近似	221	综述 (R)	291
10.8 空化	223	期刊论文 (J)	294
10.9 Parkinson 和 Jandali 的尾源模型	224	会议论文、报告等 (P)	316
10.10 Kiya 和 Arie 尾源汇模型	226	第14章 自由流湍流	321
10.11 自由流线和边界层的耦合	228	14.1 简介	321

14.2	自由流湍流相互作用	321	17.3	自由对流	388
14.3	TrW 或尾流转捩	322	17.4	强迫对流	390
14.4	TrSL 或自由剪切层转捩	323	17.5	自由流湍流影响	403
14.5	TrSL2 或扰动敏感流域	324	17.6	流向反旋旋涡	406
14.6	TrSL3 或上亚临界流域	328	17.7	其他干扰影响	414
14.7	湍流等级的泰勒数	329	第 18 章	气动噪声	418
14.8	TrBL 或边界层转捩	331	18.1	历史概况	418
14.9	湍流流域	337	18.2	风吹声	419
14.10	自由流湍流畸变	338	18.3	旋涡脱落引发风吹声	420
第 15 章	非均匀自由流	341	18.4	Lighthill 空气动力噪声理论	422
15.1	简介	341	18.5	量纲分析	423
15.2	线性剪切流	341	18.6	气动噪声强度	424
15.3	剪切流与柱体的两种位置关系	342	18.7	雷诺数的影响	426
15.4	跨过圆柱的线性剪切流	342	18.8	圆柱振荡	433
15.5	沿柱体展向剪切流	359	第 19 章	空化现象	441
15.6	理论模型	360	19.1	简介	441
15.7	“胞状”旋涡脱落	361	19.2	空化数	441
15.8	端部涡胞	362	19.3	初期空化	442
15.9	带有通气孔的端板	363	19.4	空化发展	444
15.10	旋涡形成区二次流	364	19.5	空化柱体作用力	445
15.11	剪切流中的边界层转捩	367	19.6	斯托罗哈数	450
第 16 章	可压缩流	369	第 20 章	非牛顿流	452
16.1	简介	369	20.1	简介	452
16.2	压缩效应	369	20.2	层流流态	452
16.3	流域分类	371	20.3	剪切层转捩, TrSL 流态	457
16.4	雷诺数影响	377	20.4	分离位置处转捩, TrBL0 流域	459
16.5	自由端影响	380	C. 参考文献		462
16.6	高超声速流	382	书籍 (B)		462
16.7	温度恢复	383	综述 (R)		463
16.8	自由分子流	385	期刊论文 (J)		466
第 17 章	热传导	387	会议论文、报告等 (P)		486
17.1	简介	387			
17.2	理论背景	387			

第1章 基本概念

1.1 扰流区域

当流体流过静止的物体或者物体在流体中运动时,物体周围将会形成不同的扰流区域,这些区域的范围不仅在很大程度上依赖于结构的形状、方位和尺寸,流体的流速、黏性等,也可能受各种参数微小扰动的影响。

大部分的非定常分离流是由钝体结构[⊖]产生的。钝体结构可能是像平板、三角形、矩形或者多边形柱体那样在周向存在尖角的结构,也可能是圆形、椭圆形等环形截面的柱体。对于前一种柱体,流体的分离点一般固定在尖角的位置,然而当尖角被圆角化为环形时,分离点会移动并且会随着分离区域流体结构的变化而变化。

无论结构有无尖角,对于各种形状的钝体结构,其周围的扰动流有一些相似特性,最普遍的就是分离区域的流体结构的发展是相似的。正是由于这种相似性,以某种特定形状为例进行研究,对于研究钝体结构的绕流特性是有意义的。由于振动圆柱是过去研究最广泛的一类结构,因此本书所表述的内容仅限于钝体结构中的圆形断面结构,并不能代表所有钝体结构的特点。

扰流主要通过局部风速的大小、方向和时间の変化来描述。局部的平均风速可能大于、等于或者小于自由来流风速。图 1-1 给出了扰流划分的 4 个区域:

- (i) 窄的减速流区域[⊖]。
- (ii) 两侧附在结构表面的边界层区域。
- (iii) 两侧的剪切和加速流区域。
- (iv) 较宽的被称作尾流[⊖]的下游分离流区域。

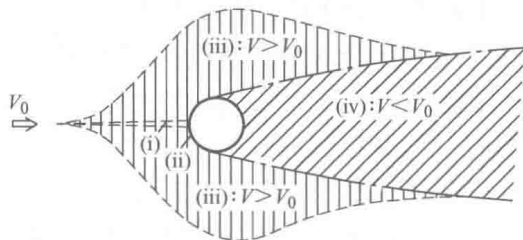


图 1-1 扰流区域划分

尽管已经发现了上游减速流区域出现意外的强流速波动,显著提高了局部的热传导,但是目前对于该区域的研究仍然很有限。此处固有的不稳定减速流形成了顺流向的非定常流动。

流体在圆柱表面分离前,边界层从正向的压力梯度转变为很小范围的负向压力梯度,分离后的边界层进一步向下游发展成为自由剪切层以及近尾流区域的边界。

关于圆柱阻挡产生的移位流区域的研究最缺乏,系统测试两侧风速变化的研究还未见报

⊖ 尽管大攻角下失速的机翼表现得更像钝体结构,但是“非流线体”也常被用于描述该类结构。

⊖ 该区域被称为“驻”区,这种描述是不准确的,因此流体在该区域并没有停止。

⊖ 尾流一词最早用于描述拖拽船体后尾部窄的流迹。

道。尾流的负压形成了剧烈变化的移位流, 在风洞或者水洞试验中移位流受近壁面的影响非常大, 这种影响被称作阻塞效应。

过去的研究多集中在尾流区域, 多数的流体结构在近尾流区域形成后慢慢衰退, 这种尾流区流体结构的形成与衰退取决于流动状态是层流状态、转捩状态还是湍流状态。

1.2 扰流区域中的转捩

Reynolds (1883J) 发现了光滑管道中流体从层流到湍流的转捩取决于流体密度 ρ 、黏度 μ 、速度 V 和管道的内径 d 。无量纲参数 $\rho V d / \mu$ 后来被称作雷诺数^①, 它表示流体的惯性力和黏性力之比, 层流到湍流的转捩发生在一定的雷诺数范围内, 转捩雷诺数范围的下限和上限称作临界雷诺数 Re_{c1} 和 Re_{c2} , 在风速增加或减小两种状态下, 上下临界雷诺数表现出明显的滞后效应。

Rayleigh (1896B, 1915J) 应用量纲分析的方法将雷诺数 (在雷诺数未命名之前) 的应用扩展到了半球或者柱体的扰流中。以圆形的外径 D 作为特征长度, 基于此, 液体中细小纤维的雷诺数从小于 1 到 100、细电线和索的雷诺数从几百到几千、烟囱的雷诺数为数百万、冷却塔和高速横风下的行星火箭的雷诺数为数千万。

流体流过钝体结构一个显著的特征就是不同扰流区域中一系列的转捩现象, 该现象由 Dryden (1941R) 首先提出, Roshko 和 Fiszdon (1969P) 进一步对其进行了说明。图 1-2 说明了随着雷诺数的变化, 三个扰流区域转捩的发展: 尾流转捩 (TrW), 剪切层转捩 (TrSL) 和边界层转捩 (TrBL)。

转捩对各种微小扰动非常敏感, 小的扰动可以促使转捩在更低的雷诺数下发生, 也可能对流体的结构产生显著的影响。这就意味着, 只有在无干扰的流体中的圆柱绕流问题, 雷诺数才是唯一的控制参数。

Roshko (1954P) 发现了图 1-2a 中的尾流转捩 (TrW) 发生的雷诺数比管道流试验中的雷诺数低了一个量级, 湍流逐步形成并随着尾流扩散, 但以自由剪切层为边界的近尾流区域仍为层流。

图 1-2b 中的自由剪切层中的转捩现象 (TrSL) 由 Linke (1931J) 首次提出, Bloor (1964J) 和 Gerrard (1965J) 进一步充实了其内容。随着雷诺数的增大, 转捩区域沿着自由剪切层向分离点移动并且影响近尾流区域的长度和宽度。

图 1-2c 中的第三个转捩发生在位于边界层的分离点处。边界层转捩 (TrBL) 被发现得最早, 相关研究也比较丰富。Costanzi (1912J) 和 Eiffel (1912J) 分别在对水和空气中的球

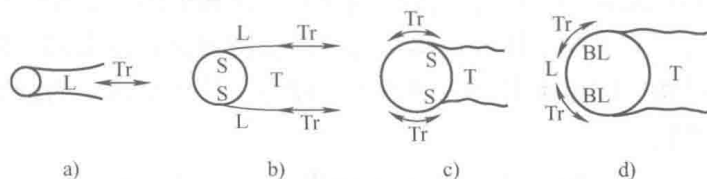


图 1-2 扰流区域的转捩

a) TrW b) TrSL c)、d) TrBL

注: BL 为边界层, L 为层流, T 为湍流, Tr 为转捩, S 为分离。

① 依据 Kármán (1954B) 的描述, A. Sommerfeld (1868—1952) 在 1908 年将其称为“雷诺数”。本书中将其简写为“Re”。

体进行研究时发现,当雷诺数 $Re = 120k^{\ominus}$ 时,球体的阻力系数会突然下降。Wieselsberger (1914J) 和 Prandtl (1961B) 解释了这种阻力的“危机”与分离点附近的边界层转捩有关。Taylor (1916P) 发现当雷诺数为 150 k 时,圆柱体的风压分布突然发生变化并认为这种变化的原因与引起球体上的阻力变化的原因相同。随后的研究进一步解释了分离点和转捩之间复杂的相互影响关系,在边界层完全发展的湍流前,这种影响导致了分离线前端流体结构的变化。

图 1-2d 所示,随着雷诺数的增大,边界层转捩继续向驻点移动,在边界层转捩 (TrBL) 的上限,转捩区域到达了减速流区域,这是第三个转捩的终点。因为所有的扰流区域都已成为完全发展的湍流,因此这也是最后一个转捩现象。以上现象可以描述为,流体流经圆柱体时,在不同的扰流区域中的层流与完全发展的湍流状态可以由三个明显的转捩状态来区分。

1.3 控制和影响参数

对于理想非扰动流下的名义二维圆柱,雷诺数是其控制参数,但多数情况下,流体中的圆柱受多种扰动的影响,这些扰动可以通过一系列的影响参数来量化,同时,所有的转捩状态都能通过雷诺数和一些与影响因素相关的初始条件的变化来描述。在一些转捩状态下,某些影响参数超过某一限值后,就会成为控制参数,在圆柱绕流中,这个重要且独特的特性目前还尚未得到很好的解释。

从概念上区分控制参数和影响参数对于理解圆柱绕流以及与之相关的大量的离散数据结果是很有意义的,但是研究人员几乎无法准确定义影响参数是如何变为控制参数的。Sarpkaya (1983) (私下交流) 指出,某给定控制参数组合中的影响参数可能会变为另一个控制参数组合中的控制参数,因此进一步正确地对参数进行分类,还需要进行详细的试验研究。

在现实中最常遇到的影响参数就是一些不规则的稳定或周期性的干扰。在实际应用中最常出现的干扰就是来流的湍流,如图 1-3a 所示。一个三维的随机脉动风速可以用湍流强度 T_i 、湍流积分尺度 T_s 和频率谱 FS 来描述。直到 20 世纪 30 年代人们才开始测试湍流参数,60 年代开始研究湍流强度 T_i ,在最近的十几年中湍流强度 T_i 和湍流积分尺度 T_s 才被成功模拟。因此在此之前的试验数据包含未知参数 T_i 和 T_s 的影

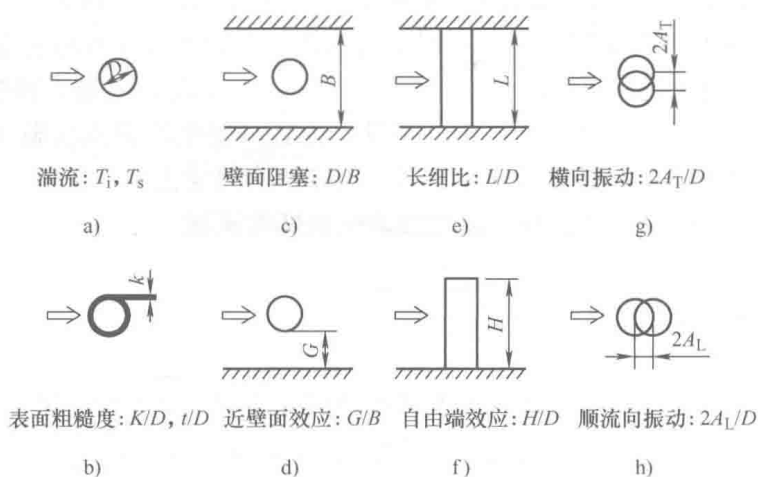


图 1-3 典型扰动类型

a) 湍流 b) 表面粗糙度 c) 壁面阻塞 d) 近壁面效应 e) 端部效应
f) 自由端效应 g) 横向振动 h) 顺流向振动

$\ominus$ 字母 k 代表 10^3 (即千)。

响,大量的数据是在低湍流度下测得的,不能直接在实际中应用。在扰动区域的各种转换也无一例外地受到来流湍流的影响。

另一个对多数实际应用非常重要的不规则干扰就是结构表面粗糙度,如图 1-3b 所示,表面粗糙度的影响至少可以归结为两个影响参数,一个是相对粗糙程度 K/D ,另外一个则是材质结构。目前多数研究都针对的是光滑圆柱,这两个影响参数没有考虑在内。

另一个在多数试验中都会出现的稳定干扰是壁面阻塞,这种现象在实际应用中并不会出现。风洞或者水洞的壁面会严重限制侧向的扰流从而在侧向形成附加的压力梯度,如图 1-3c 所示。当阻塞比较大时,非对称的阻塞会引起一侧出现边界层,如图 1-3d 所示。对于较小的距离与直径比, G/D 可能会成为控制参数。

端部效应是一个不太明显的干扰因素,目前的研究也比较匮乏。在大多数的试验研究中,圆柱的两端都浸没在侧壁形成的边界层中(见图 1-3e)从而确保流体沿圆周轴向的相互关系。长细比 L/D 是“准”二维圆柱模拟中常见的影响参数,对于如图 1-3f 所示的包含自由端的有限长度圆柱,长细比会成为控制参数。

横流向或者顺流向的振动影响很大,超过某个临界振幅的振动造成的影响远大于其他的干扰造成的影响,如图 1-3f、g 所示。在某个确定的流速范围内,自由振动和强迫振动的振幅和频率是影响流动的控制参数。

1.4 无扰动流形态

大量的试验观测结果说明随着扰流结构的发展和消失,出现了各种规则及不规则流动形态。在一定的雷诺数范围内,流态的变化有限,因此可以通过雷诺数范围来区分不同流态,本书采用的正是这种流态的区分方式。在完全非扰动流下,流态只跟雷诺数的取值范围有关。在保证所有影响参数取值尽可能小的情况下,试验得到的结果更接近非扰动流。一些潜在的不确定因素常常使得这种依据雷诺数划分流域的规定变得不确定。因此 Morkovin (1964R) 提出了采用一系列雷诺数值来划分所有流域的起点和终点。

流体的状态可能是完全层流状态 (L),或者是尾流转捩 (TrW)、剪切层转捩 (TrSL) 和边界层转捩 (TrBL) 中的一种,或者是完全的湍流状态 (T)。每一种状态被描述为各种不同的流域,从而解释观测到的流体结构的变化。当任何一个影响参数变为控制参数时,一些流域就可能被替换、消失或者生成新的流域。

1.5 层流 L

扰动流的层流状态至少可以被划分为三个基本的流域:

- (i) L1: 非分离域中的蠕变流; $0 < Re < (4 \sim 5)$ 。
- (ii) L2: 稳态分离或者封闭的近尾流域; $(4 \sim 5) < Re < (30 \sim 48)$ 。
- (iii) L3: 周期层流; $(30 \sim 48) < Re < (180 \sim 200)$ 。

如图 1-4 所示,蠕动流紧贴柱体周向的表面流动,在非分离域中,稳定且对称的层流剪切层外的尾部并未形成可见的尾流。

如图 1-5 所示,当雷诺数 $Re = (4 \sim 5)$ 时,流体开始分离并形成明显的、稳定的、对称

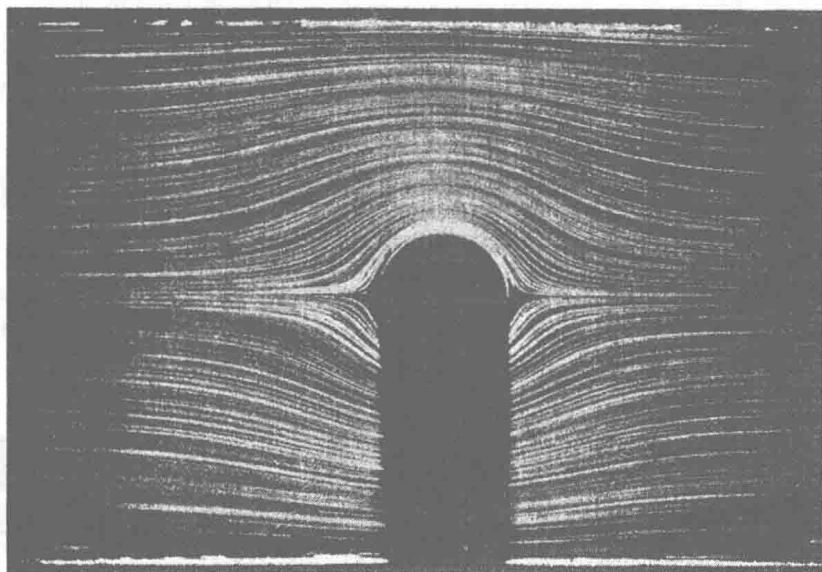


图 1-4 蠕动流 [$Re = 1$, Camichel 和 Escande (1938R)]

的、封闭的近尾流。自由剪切层与近尾流的终点在尾流的封闭点的交汇点[⊖]处交汇，近尾流处沿轴向的反向流速通常比自由来流的流速小一个量级，随着曝光时间的增加，图像显示出了这种近尾流区域中形成的微弱循环流呈现出明显对称旋涡，这种旋涡被称为 Föpl (1913P) 的对称涡[⊖]。

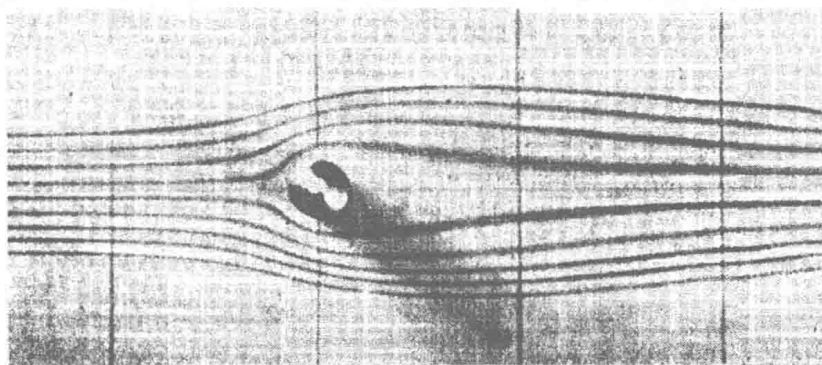


图 1-5 稳定的封闭近尾流区域 [$Re = 23$, Thom (1933J)]

当 $Re > (30 \sim 48)$ 时，细长的封闭近尾流区域变得不稳定，如图 1-6a 所示，在流线的交汇处出现了剪切层的正弦振荡，这种自发的振荡对扰动非常敏感，振荡的雷诺数 Re_{osc} 取决于具体的试验工况。随着雷诺数的增大，振荡的幅度变大，当雷诺数 $Re > (45 \sim 65)$ 时，如图 1-6b 所示，剪切层在振荡轨迹波峰和波谷出现卷曲，最终形成错列的层流旋涡，如图 1-6c 所示。

⊖ Cantwell (1976P) 建议采用交汇点。Nisi 和 Porter (1923J) 将其称作“中性点”，Schwabe (1935J) 采用“自由驻点”，该称呼可能得到了 Prandtl 的认可。

⊖ 在原书中“eddy”表示真实流动中的旋转流体，“vortex”表示理论流体中的单点非旋转流体。在翻译稿中统称为旋涡。

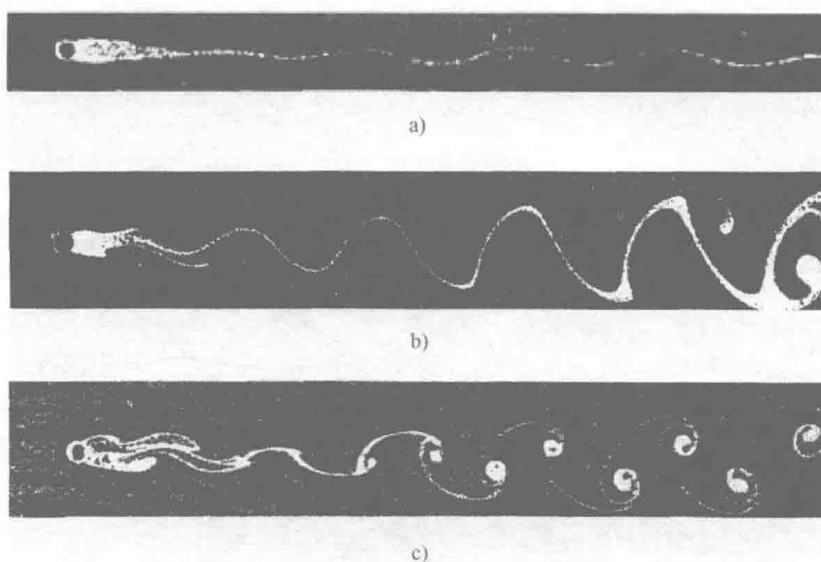


图 1-6 周期性层流尾迹 [Homann (1936J)]

a) $Re = 54$ b) $Re = 65$ c) $Re = 102$

Bénard (1908Ja, b) 通过水表面可见的涟漪首次[⊖]观测到拖拉圆柱尾部交替出现的旋涡, 如图 1-7a 所示。基于水表面的可见涟漪如图 1-7b 所示。Kármán (1911P, 1912P) 从理论上研究了两行旋涡的稳定性, 并由此引发了研究人员对该问题广泛和持续的关注。基于此, 本书将在层流尾迹中旋涡的出现称为 Kármán-Bénard 涡街, 交替出现的旋涡的沿层流尾迹的发展如图 1-6 所示, Kovasznay (1949J) 认为这种现象的层流尾迹是不稳定的。

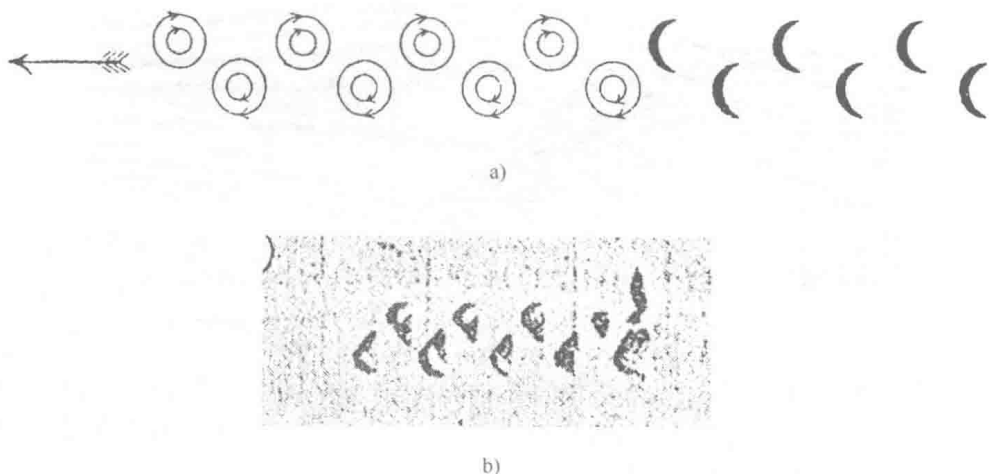


图 1-7 Bénard 的试验结果 [Bénard (1908Ja, 1913Ja)]

a) 交替涡街的示意图 b) 水面涟漪的胶卷影像

Taneda (1956J)、Morkovin (1964R) 和 Gerrard (1978J) 建议将周期层流域划分为两

[⊖] Henri Bénard 教授 (1874—1939) 声称在更早的 1908 年观测到了该现象, Theodor von Kármán (1911P) 是在其 1911 年的著作中提到的。参考 Kármán (1954B) 69 页。