

翻译版

圆柱绕流 II ——应用

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

马文勇 刘庆宽 杜晓庆 刘小兵 刘福军 译

Flow Around Circular Cylinders
Vol 2: Applications



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 II ——应用

(翻译版)

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



机械工业出版社

本书译自 M.M. 斯特兰科维奇教授所著的《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，本书是该著作的第Ⅱ卷：应用。

本书主要介绍了圆柱的几何外形和布置方式对圆柱绕流的影响，其中主要包括长细比影响、表面粗糙度和直径变化的影响、阻塞和边界的影响、倾斜圆柱和多个圆柱的影响等。同时本书也讨论了边界层控制方面的研究成果。以上内容的讨论不仅可以反映圆柱结构在实际工程中的应用需求，也为类似情况下的物理模拟试验提供了丰富的可以借鉴的经验。

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 2: APPLICATIONS/By M. M. ZDRAVKOVICH/ISBN: 9780198565611

© M. M. ZDRAVKOVICH, 2003 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：01-2013-7861 号。

图书在版编目（CIP）数据

圆柱绕流：翻译版. Ⅱ，应用/（赛尔）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，2018. 11

（时代教育·国外高校优秀教材精选）

书名原文：Flow Around Circular Cylinders Vol 2: Applications

ISBN 978-7-111-61162-2

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（2018）第 238558 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 责任校对：郑 婕

封面设计：张 静 责任印制：张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·26 印张·636 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-61162-2

定价：118.00 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

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金 书 网：www.golden-book.com

译者序

在《圆柱绕流 I——基础》的译者序中，我们提到圆形可能是自然界中存在最广泛的一种形状，也是流体力学、机械工程、土木工程、航海工程、航空和航天等领域中应用最广的基本形状之一。这也是圆柱绕流问题在过去的几个世纪被持续关注和广泛研究的主要原因之一。另一个令人困惑和着迷的现象是：即使刻意加工出的圆柱结构，在实际应用中也很难表现出近似理想二维圆柱的绕流状态和气、水动力特点。由于各种影响参数都可能在某种条件下对圆柱绕流形态产生重要的影响，因此在实际工程中，从绕流和流体动力的角度看，几乎无法找到理想的二维圆柱模型。这种现象在圆柱气动力测试中被大量证明，我们在进行亚临界区圆柱气动力测试的过程中发现，对于长细比接近 10 的圆柱，其中心位置的局部阻力系数在有无端板的情况下出现超过 20% 的巨大差异，两种状态下的绕流形态完全不同。这种巨大的差异，甚至超过了圆形与椭圆形阻力系数的差别。我们认为，对圆柱绕流影响参数的深入研究对其工程应用具有非常重大的意义。

本书译自 M. M. 斯特兰科维奇教授所著《FLOW AROUND CIRCULAR CYLINDERS》的第二卷——应用。与《圆柱绕流 I——基础》相比，本书从工程应用的角度对影响圆柱绕流特点的重要影响参数及其影响规律进行了归类总结。书中除了阐述长细比、端部状态、表面粗糙度、阻塞率等参数对圆柱体绕流状态及气、水动力的影响外，还介绍了几何外形的三维特性对其的影响，如大量应用于烟囱等高耸结构的锥形立面、广泛应用于冷却塔的双曲立面、倾斜圆柱等，以及多个圆柱相互干扰的影响。上述影响参数都是从实际工程中提炼出来的常见影响因素，其影响规律以及其产生机理对实际工程中的圆柱结构具有很强的指导意义。

在本书中，作者 M. M. 斯特兰科维奇教授多次提到，某些问题将在第三卷中进一步讨论。很遗憾，作者于 2006 年不幸离世，截止到 2018 年，第三卷尚未出版。相信读完《圆柱绕流 I——基础》和《圆柱绕流 II——应用》之后，您一定也会感到非常遗憾。诚如作者所言，仍有许多问题需要进一步讨论。在我们对圆柱气动力特性及风致振动的研究中发现来流特性对圆柱绕流的影响、各类振动圆柱的绕流特性、后临界区的圆柱绕流特性等方面仍需进一步研究。

本书除了国际单位制单位以外，还采用了部分英制单位，其换算关系如下： $1\text{ft} = 0.3048\text{m}$ ， $1\text{in} = 2.54\text{cm}$ ， $1\text{lb} = 0.45359\text{kg}$ 。

最后，诚挚地邀请您加入到圆柱绕流的“拼图游戏”中。对于本书中可能出现的翻译错漏，表达不及的地方，希望各位专家和读者朋友们不吝赐教，给我们发邮件进行交流：mawenyong@126.com，期待您的邮件。

译者
2018 年 7 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。第 I 卷出版于 1997 年，主要包含 A、B、C 三部分：

(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。

本书为第 II 卷，主要包含

(D) 几何参数的影响，包括相对表面粗糙度、长细比、锥化、阻塞度、有限长度、倾斜、旋转、临近壁面、两圆柱、圆柱群、圆柱阵列等。

另外还未写的第 III 卷将会包含：

(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 (B)，包括全集 (部分相关内容)。

(ii) 综述 (R)——高度相关，对入门阅读非常有用。

(iii) 期刊论文 (J) (容易获得)。

(iv) 会议论文、报告、学位论文 (P) 等 (难获得)。

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。

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。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：

Peter BEARMAN, Eberhard BERGER, Jack GERRARD, Hiroyuki HONJI, Tamotsu IGARASHI, Mark MORKOVIN, Eduard NAUDASCHER, Atsushi OKAJIMA, Michael PAIDOUSSIS, Geoff PARKINSON, Turgut SARPKEYA and Samir ZIADA.

书中引用的图片也得到了以下期刊和版权所有者的使用授权：

Aeronautical Journal, Royal Aeronautical Society; *AIAA Journal and Journal of Aircraft*, American Institute of Aeronautics and Astronautics; *Applied Scientific Research*, Kluwer; *ASCE Journals Engineering Mechanics Division, Structural Division, and Water Division*, American Society of Civil Engineers; *ASME Journals: Basic Engineers, Fluids Engineering, Heat Transfer, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Power, Pressure Vessel Technology, and Mechanical Engineer*, American Society of Mechanical Engineers; *Atmospheric Environment*, Pergamon Press; *BMT Reports*, British Maritime Technology Ltd; *Bulletin JSME and Transactions JSME*, Japanese Society of Mechanical Engineers; *Bulletin Research Institute of Applied Mechanics*, Kyushu University; *Experiments in Fluids*, Springer Verlag; *Fluid Mechanics Research*, Begell House Inc.; *Flow Visualization Conferences*, Hemisphere Publications Inc.; *IEEE Conferences*, Institute of Electrical and Electronic Engineers; *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Pergamon Press; *Heat Transfer Japanese Research*, Society of Chemical Engineers of Japan; *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press; *Journal of Fluids and Structures*, Academic Press; *Journal of Mechanical Engineering Science*, Institution of Mechanical Engineers; *Journal of Physical Society of Japan*, Physical Society of Japan; *Journal of Science*, Hiroshima University; *Journal of Sound and Vibration*, Academic Press; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier; *L' Aeronautique et L' Astronautique*, Elsevier; *Max Planck Institute Reports*, Göttingen; *OTC Papers*, Offshore Technology Conference, Houston, Texas; *Physics of Fluids*, American Institute of Physics; *Proceedings Ferrybridge Cooling Towers and After*, Institution of Civil Engineers; *Transactions ICE*, Institution of Chemical Engineers; *Transactions RINA*, Royal Institute of Naval Architects; *Wärme und Stoffübertragung*, Springer Verlag; *Zeitschrift für Flugwissenschaften und Luftfahrtforschung*, Springer Verlag.

最终的 LATEX 版是由 S. G. Sajjadi 博士完成的，D. Millward 女士完成了所有参考文献和说明文字的输入，他们两位都来自斯坦福大学。我的小女儿 Sandra 阅读了草稿并进行了多次修改。我由衷地感谢来自 OUP 的 Julie Harris 博士和 Richard Lawrence 先生在对本书进行细心的编辑过程中提供的大量帮助，他们的帮助极大地提高了本书的质量。

M. M. 斯特兰科维奇
英国兰开夏郡索尔福德市
2001 年 5 月 25 日

目 录

译者序

前言

致谢

第 21 章 长细比	1
21.1 引言	1
21.2 马蹄涡流系统	1
21.2.1 层流边界层	2
21.2.2 振荡马蹄涡流系统	3
21.2.3 湍流边界层	3
21.3 封闭测试段	6
21.3.1 定常层流尾流, L2 流域	6
21.3.2 周期层流尾流, L3 流域	7
21.4 圆柱横跨自由射流	8
21.5 端板	11
21.5.1 层流周期尾流, L3 流域	11
21.5.2 单个端板影响	11
21.5.3 两个端板影响	14
21.5.4 尾流转捩, TrW 流态	15
21.5.5 剪切层转捩, TrSL 流态	16
21.5.6 小长细比	16
21.5.7 脉动力	18
21.5.8 边界层转捩, TrBL 流态	20
21.6 自由表面	21
21.7 理论模型	23
21.7.1 Landau 模型	23
21.7.2 Landau 模型的推广	24
21.7.3 其他理论模型	24
21.8 一端自由	26
21.8.1 周期层流尾流, L3 流域	26
21.8.2 自由端部的次流动	28
21.8.3 平均压力的展向变化	30
21.8.4 局部阻力系数沿展向的变化	31
21.8.5 展向脉动压力系数和升力系数	33
21.8.6 沿展向斯托罗哈数的变化	34
21.8.7 对称涡街	36
21.8.8 在边界层中的短圆柱	37

21.8.9 TrBL4 流域的有限圆柱	38
21.8.10 自由端附近的旋涡脱落	40
21.8.11 局部脉动升力和阻力	40
21.8.12 自然风中的有限圆柱	41
21.8.13 燃料储罐	43
21.9 两端自由	44
21.9.1 阻力随长细比的变化	44
21.9.2 对称压力分布	46
21.9.3 小长细比, $L/D < 1$	47
第 22 章 表面粗糙度和直径变化	49
22.1 引言	49
22.1.1 表面粗糙的特点	50
22.1.2 Fage 和 Warsap 的玻璃纸试验	51
22.1.3 表面摩擦力分布	53
22.1.4 斯托罗哈数的变化	54
22.1.5 相关长度和涡量耗散	55
22.2 表面粗糙材质/结构	56
22.2.1 金字塔形粗糙结构	56
22.2.2 砖墙的粗糙结构	58
22.2.3 线网粗糙结构	59
22.2.4 海洋形成的粗糙结构	60
22.2.5 部分表面粗糙	61
22.2.6 粗糙雷诺数	61
22.3 绊线	63
22.3.1 研究历史介绍	63
22.3.2 Fage 和 Warsap 的绊线试验	63
22.3.3 绊线位置的影响	64
22.3.4 流态的分类	66
22.3.5 错列的分离线	67
22.3.6 绊线和分离线	69
22.3.7 螺旋线和边条	70
22.3.8 多股绞线的索或者导线	71
22.4 绊球	74
22.4.1 成对出现的绊球	74
22.4.2 展向成排绊球	75
22.5 其他的表面粗糙	76

22.5.1 流向旋涡发生器	76	23.3.6 自由来流湍流度的影响	117
22.5.2 锯齿形叶片	77	23.4 边界层转换, TrBL 流态	118
22.5.3 凹坑表面	79	23.4.1 引言	118
22.5.4 展向切口	80	23.4.2 阻力随阻塞比的变化	119
22.5.5 鳍状板	82	23.4.3 斯托罗哈数和脉动力	119
22.5.6 周向的划槽	83	23.5 理论修正模型	122
22.5.7 表面摩擦和边界层	83	23.5.1 引言	122
22.5.8 局部划槽	84	23.5.2 Fage 的阻塞修正	123
22.5.9 展向划槽	84	23.5.3 Lock 的映像法	124
22.6 变直径圆柱	85	23.5.4 Glauert 的半经验公式	125
22.6.1 引言	85	23.5.5 Allen 和 Vincenti 的源模型	126
22.6.2 层流周期尾流, L3 流态	85	23.5.6 Maskell 的修正模型	127
22.6.3 剪切层转换, TrSL 流态	87	23.5.7 Modi 和 El-Sherbiny 的流线 模型	130
22.6.4 TrSL3 流域的阶梯干扰	88	23.6 非对称阻塞	131
22.7 锥化圆柱	88	23.6.1 层流尾流	131
22.7.1 层流周期尾流, L3 流域	88	23.6.2 湍流尾流	132
22.7.2 沿展向涡胞	90	23.7 近壁面的影响	133
22.7.3 理论模型	90	23.7.1 引言	133
22.7.4 湍流尾流, TrSL 流态	91	23.7.2 流域的分类	133
22.7.5 包含自由端的锥化圆柱	93	23.7.3 接触流域	134
22.8 直径的非线性变化	93	23.7.4 圆在边界上的势流流动	136
22.8.1 引言	93	23.7.5 小间隙流域	137
22.8.2 冷却塔	94	23.7.6 大间隙流域	140
22.8.3 模型试验	95	23.7.7 壁面边界层效应	141
22.8.4 雷诺数外插的有效性	96	23.8 边界的侵蚀与冲刷	144
22.8.5 表面粗糙度	97	23.8.1 冲刷机理	144
22.8.6 子午线肋条	97	23.8.2 作用力和斯托罗哈数	145
22.8.7 阵风中的冷却塔模型	100	第 24 章 边界层控制	148
22.8.8 自然风下的现场实测	100	24.1 引言	148
22.8.9 渡桥电厂倒塌的可能原因	102	24.2 旋转圆柱	148
第 23 章 阻塞和洞壁距离	105	24.2.1 Magnus 效应	148
23.1 引言	105	24.2.2 流动类型的分类	149
23.2 层流, L 流态	105	24.2.3 Prandtl 的环量概念	150
23.2.1 蠕流, L1 流域	105	24.2.4 势流理论	151
23.2.2 封闭的近尾流, L2 流域	106	24.2.5 Bickley 的势流模型	152
23.2.3 近尾流的不稳定性	108	24.3 雷诺数效应	154
23.2.4 层流周期尾流, L3 流域	109	24.3.1 层流, L3 和转换, TrW 尾流	154
23.3 剪切层转换, TrSL 流态	112	24.3.2 TrSL 流态的压力分布	156
23.3.1 阻塞机理	112	24.3.3 反 Magnus 效应	160
23.3.2 平均压力分布和阻力	113	24.3.4 边界层	161
23.3.3 斯托罗哈数和脉动压力	113	24.3.5 斯托罗哈数	164
23.3.4 涡脱落的抑制	114	24.3.6 端板的影响	164
23.3.5 涡的强度及其相关性	116		

24.3.7	表面粗糙度和鳍状板的效应	166	25.5.2	与横流向脉动流的相似性	210
24.3.8	远尾流的发展	167	25.5.3	分离旋涡的强度	211
24.4	应用	169	25.5.4	垂直与侧向力分量	212
24.4.1	Flettner 的转子船	169	25.5.5	雷诺数的影响	214
24.4.2	转子风车	170	25.5.6	马赫数的影响	215
24.4.3	Madaras 发电站项目	170	25.5.7	分离不稳定性	216
24.4.4	Wallis 的“水坝破坏器”	171	25.5.8	旋涡分离的抑制	217
24.5	表面的旋转角振荡	172	第 26 章	双圆柱	218
24.5.1	物理背景	172	26.1	引言	218
24.5.2	层流 L2 和 L3 流域	173	26.2	串列布置	221
24.5.3	Navier-Stokes 方程的解	175	26.2.1	蠕动流态 (L1 流态)	221
24.5.4	强迫旋转振荡的旋涡脱落	177	26.2.2	Kármán-Bénard 涡街 (L3 流态)	222
24.6	同轴旋转圆柱	179	26.2.3	TrSL 流态的早期研究	223
24.6.1	引言	179	26.2.4	风压分布的改变	225
24.6.2	Taylor 的理论和试验	179	26.2.5	斯托罗哈数	227
24.6.3	Coles 的进一步转换	181	26.2.6	阻力系数	229
24.6.4	流域分类	182	26.2.7	边界层的转换, TrBL, 流态	230
24.7	吹吸边界层控制	183	26.2.8	来流湍流度的影响	231
24.7.1	抽吸	183	26.2.9	表面粗糙度的影响	233
24.7.2	多孔介质表面抽吸	184	26.2.10	有限高度的影响	233
24.7.3	Thwaites 襟翼	185	26.2.11	热传递的影响	234
24.7.4	射流吹气	187	26.3	并列布置	235
24.7.5	升力和阻力	187	26.3.1	干扰流态分类	235
24.7.6	Dunham 的理论模型	188	26.3.2	层状尾流	236
第 25 章	倾斜圆柱	191	26.3.3	斯托罗哈数	238
25.1	引言	191	26.3.4	阻力和升力	239
25.2	L2 和 L3 流域的层流尾流	192	26.3.5	偏向间隙流的起因	241
25.2.1	斯托罗哈数	192	26.3.6	分割板和声学效应	242
25.2.2	端板的影响	194	26.3.7	Landweber 的理论模型	243
25.2.3	自由端和倾斜圆柱	195	26.3.8	其他理论模型	245
25.3	剪切层转换, TrSL 流域	197	26.3.9	边界层转换 (TrBL 流态)	245
25.3.1	旋涡形成区域和基准压力	197	26.3.10	来流湍流度的影响	247
25.3.2	椭圆断面	198	26.4	错列布置	248
25.3.3	端板的影响	199	26.4.1	干扰流态分类	248
25.3.4	长细比的影响	201	26.4.2	层流状态 (L)	249
25.3.5	表面摩擦	201	26.4.3	TrSL 流态下的平均压力分布	250
25.3.6	斯托罗哈数	203	26.4.4	TrSL 流态下的升力和阻力	251
25.3.7	阻力系数	205	26.4.5	间隙流干扰机理	252
25.4	TrBL 流域的湍流尾流	205	26.4.6	尾流偏移干扰机理	253
25.4.1	与海洋相关的表面粗糙度	207	26.4.7	斯托罗哈数	254
25.4.2	多股绞线和导线	207	26.4.8	边界层转换 (TrBL 流态)	254
25.5	大入射角	209	26.4.9	来流湍流度的影响	256
25.5.1	流动状态的分类	209			

26.4.10 绞合导线	257	圆柱群	301
26.4.11 有限长细比的影响	257	27.4.4 3×3, 4×4, …, n×n 圆柱群	301
26.4.12 双冷却塔	258	27.5 卫星式的圆柱群	303
26.5 两个不同尺寸的圆柱	260	27.5.1 引言	303
26.5.1 布置方式的分类	260	27.5.2 干扰参数	303
26.5.2 串列圆柱, $D_1/D_2 < 1$	260	27.5.3 卫星圆柱群上的力	304
26.5.3 串列圆柱, $D_1/D_2 > 1$	261	27.5.4 卫星柱群间距的影响	306
26.5.4 串列圆柱的 St 数	263	第 28 章 多管阵列	310
26.5.5 涡脱的同步	263	28.1 引言	310
26.5.6 错列布置的不等圆柱	264	28.2 单列管阵	312
26.5.7 上游控制圆柱	265	28.2.1 间隙射流	312
26.5.8 控制圆柱位于层流区外	266	28.2.2 非均匀流的结构	313
26.5.9 边界层控制	268	28.2.3 平均压力分布和气动力	316
26.5.10 自由剪切层控制	268	28.2.4 转换为湍流发生在 TrBL	
26.6 两个圆柱垂直交错	270	流态中	317
26.6.1 引言	270	28.2.5 流体的亚稳态	317
26.6.2 圆柱上的局部压力和力	271	28.2.6 亚稳态的抑制	318
26.6.3 可能的拓扑结构	274	28.2.7 斯托罗哈数	318
26.6.4 两个交叉圆柱	275	28.2.8 邻近的影响	319
26.6.5 圆柱间隙的影响	277	28.3 同轴的管柱阵列	322
第 27 章 圆柱群	278	28.3.1 平均压力分布	322
27.1 引言	278	28.3.2 脉动力	325
27.2 三个圆柱	279	28.3.3 表面粗糙度的影响	325
27.2.1 同轴柱群	279	28.3.4 声音共振: 历史背景	327
27.2.2 绊线的影响	281	28.3.5 管柱阵列中的声音速度	328
27.2.3 三个不同直径的圆柱	282	28.3.6 声音的激励和抑制	329
27.2.4 并列和错列的圆柱群	283	28.3.7 欧文 (Owen) 振动模型	330
27.2.5 低雷诺数时的三角形布置		28.3.8 间隙流, 转换涡	332
圆柱群	284	28.3.9 射流剪切层的不稳定性	332
27.2.6 三角形圆柱群力	288	28.3.10 声波同步机理	334
27.2.7 三角形圆柱群, 斯托罗哈数	288	28.3.11 间隙流和湍流	337
27.2.8 不规则的三角形布置圆柱群	291	28.3.12 同轴管柱阵列的分类	338
27.3 四个圆柱	292	28.4 错列管柱阵列	339
27.3.1 并排圆柱群	292	28.4.1 邻近影响	339
27.3.2 热传递	295	28.4.2 平均和脉动压力	339
27.3.3 并列圆柱群	295	28.4.3 间隙流的结构	341
27.3.4 正方形布置圆柱群的力	295	28.4.4 管柱位移的影响	343
27.3.5 矩形布置的圆柱群, 斯托罗		28.4.5 表面粗糙度的影响	345
哈数	297	28.4.6 斯托罗哈数的已有研究	346
27.4 $n > 4$ 的圆柱群	299	28.4.7 平行三角形管柱阵列	346
27.4.1 五个圆柱并列的圆柱群	299	28.4.8 转角方形阵列	348
27.4.2 七个圆柱并列的圆柱群	301	28.4.9 较为普遍的三角排列	350
27.4.3 六个和八个圆柱, 多边形的		28.4.10 新的普遍的 St , 一个提议	351

28.4.11 最大声压水平及其预测	352	参考文献	356
28.5 圆柱阵列内部和后边的不均匀 流体	353	书籍 (B)	356
28.5.1 相关历史的介绍	353	综述 (R)	357
28.5.2 不均匀的空隙流	354	期刊论文 (J)	360
		会议论文、报告、学位论文等 (P)	391

第 21 章 长 细 比

21.1 引言

“我们应该认识到，即使在二维圆柱绕流的问题上，直到近些年试验和理论在该领域才能达到比较满意的结果，并且采用二维流动的理论来解释大多数关于圆柱绕流测量结果包含诸多偏差和失真。” Marc V. Morkovin (1964R)

人们坚信均匀自由来流中的长的名义二维圆柱的绕流一定是二维的。大长细比（定义为长度与直径的比 L/D ）被认为是保证流动沿展向二维的必要条件。此外，已经假设圆柱末端是造成流动三维性的唯一原因。这些任意的假定极大地延后了长细比效应的研究。

圆柱可以附在封闭测试段的侧壁上，可以跨越自由射流，或者使其一端或两端自由伸入流动中。根据其末端的影响，可对长细比效应进行简单的分类：

(i) 大多数普通风洞都有一个封闭的测试段，圆柱从一个侧壁延伸到另一个侧壁。壁面边界层在圆柱末端上游分离，卷起，并形成马蹄涡流[⊖]系统。该涡指在圆柱下游与来流方向对齐的螺旋涡流。

(ii) 具有开放测试段的风洞较少，圆柱从自由射流凸出。圆柱两个末端都受射流剪切层的影响。

(iii) 端板是最常用的减小末端效应的方法。它们被设计用来防止沿跨向的横向流动，并且保持相同的尾流尺寸和形状。然而，对端板之间距离较小的情形， $L/D < 2$ ，在一些流域下会形成尺寸和形状完全不同的近尾流。

(iv) 带一个自由端有限长圆柱的实际结构包括烟囱、电视塔、灯塔、储油罐等。自由端可以是开放的（有、无出流）或是封闭的（如平头、圆头、半球形、圆锥形等）。自由端导致了沿展向的强三维流动。

(v) 另一个可能是带两个自由端的短圆柱，比如轮子、硬币、AWACS[⊖]、飞盘等。当 $L/D < 5$ 时，在两自由端产生的三维流动存在强烈的相互干扰。

本章描述在以上分类长细比对沿圆柱和绕圆柱流动的影响。

21.2 马蹄涡流系统

马蹄涡流系统的出现在工程应用上是很普遍的，并且其出现形式也常常不同。河床桥墩下的冲刷就是由马蹄涡流下的高剪切应力引起的。其他例子还有飞机上机翼和机身的结合处、涡轮机械叶片的根部、管道的支柱位置、大气边界层中的高层建筑等。建筑师常常需要

⊖ 涡流一词在此处用于强调马蹄涡的三维特性。

⊖ AWACS 代表机载警告和指挥系统。

关注抑制高层建筑周围马蹄涡流的形成从而提高有风时广场上行人的舒适度。

21.2.1 层流边界层

除了在圆柱上游一定距离内,沿风洞测试段壁面的边界层处处受零压力梯度的影响。圆柱末端浸没在受阻边界层内,这意味着存在逆压梯度。并导致三维分离,随后是分离边界层的月牙状卷曲并形成涡流系统。马蹄涡流绕圆柱底部扫过并呈现导致其名称的特征形状。

马蹄涡流最早的草图是由(达)芬奇绘制的。图 21.1a 再现了 Sutton 在剑桥拍摄的早期照片。壁面边界层是层流,有限圆柱 $H/D=0.5$, 涡流系统的可视化是通过在上游向自由来流射入烟丝实现的。

在图 21.1a 圆柱上游可以看见几个涡,并且在下壁面中可以看见流动模式的反射。有两个大涡沿顺时针方向旋转,两个三角形涡沿逆时针方向旋转。图 21.1b 显示了涡流系统的流动拓扑。边界层的主分离用 S 表示,由涡诱导的二次分离由 S_1 和 S_2 表示。交汇点和再附点分别由 SP_1 、 SP_2 和 A_0 、 A_1 、 A_2 表示。

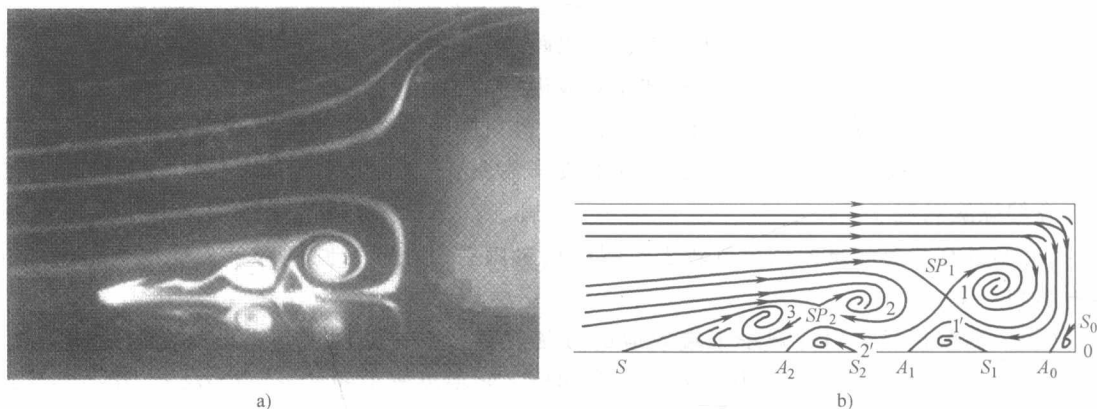


图 21.1 $H/D=0.5$, 圆柱紧贴壁面并处在层流边界层中, Sutton 做的圆柱上游流动显示, Baker (1979J)

a) 照片 b) 拓扑图

控制这个现象的物理参数是壁面边界层厚度 δ_B 和圆柱直径 D 。壁面边界层可能是层流或湍流,取决于 $Re_B = V\delta_B/\nu$ 。圆柱由长细比 H/D 和 $Re = VD/\nu$ 来定义。有两个基本的无量纲参数,即 D/δ_B 和 H/δ_B (当 $H \gg \delta_B$ 时,后者可以忽略)。大多数研究者使用与圆柱边界层有关的圆柱雷诺数 (Re),而 Re_B 与壁面边界层有关。

马蹄系统中涡流的数量与流动速度和壁面边界层厚度有关。图 21.2 显示了 Baker (1979J) 观察到了 2、4、6 个涡,其后是非定常涡流。当圆柱 Re 数增加,或者边界层厚度降低时出现更多的涡流。注意, D/δ_B 的变化是由 δ_B 降低和速度增加导致的。在 6 涡流区以外,整个涡流系统首先以一种规则的方式

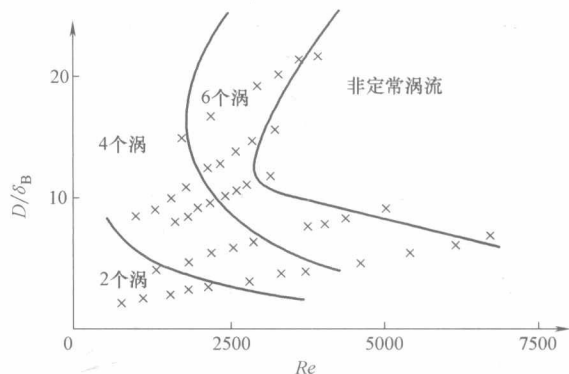


图 21.2 D/δ_B 和 Re 平面的多涡流区域, Baker (1979J)

式振荡。速度更高时, 流动变成非定常湍流, 没有周期性可循。

21.2.2 振荡马蹄涡流系统

如图 21.2 所示, 当 Re 数足够高, 且当 $D/\delta_B > 10$ 时, 层流马蹄涡流系统变得不稳定并且开始振荡。Baker (1979J) 制作了振荡马蹄系统的影像。图 21.3 再现了一些流态序列。主涡流开始向圆柱移动 (图 21.3 中的画面 2 和 4)。供给烟丝被切割 (图 21.3 中的画面 6 和 8), 涡流被孤立并且开始收缩 (图 21.3 中的画面 10 和 12)。十二帧画面代表振荡周期的一半, 其后涡流开始向上游移动, 在那里它再次获得来自剪切层的烟丝供给。Baker (1979J) 发现当 $Re_B = 125$ 时振荡开始。

Schwind (1962P) 观察到一个相似的马蹄涡流, 他试图进行流域分类。遇到的困难是流域的大量重叠。在任意速度下, 热线在不同时刻都能监测到四种不同波形:

- (i) 稳定流动, 无振荡痕迹。
- (ii) 低频马蹄涡流系统振荡, $St \approx 0.26$ (基于 D)。
- (iii) 高频马蹄涡流系统振荡, $St \approx 0.4 \sim 0.6$ 。
- (iv) 不规则湍流痕迹。

上述流域中的每一个都可以存在于 1s 和 5min 之间的任何时间段, 之后流动以完全随机的方式从一个流域切换到另一个流域。Baker (1979J) 发现, 在圆柱上添加分隔平板或用流线型支柱代替圆柱体对振荡没有影响。

Baker (1991J) 提出关于马蹄涡流振荡性质的两个假设:

- (i) 涡流核的不稳定。
- (ii) 壁面边界层的不稳定。

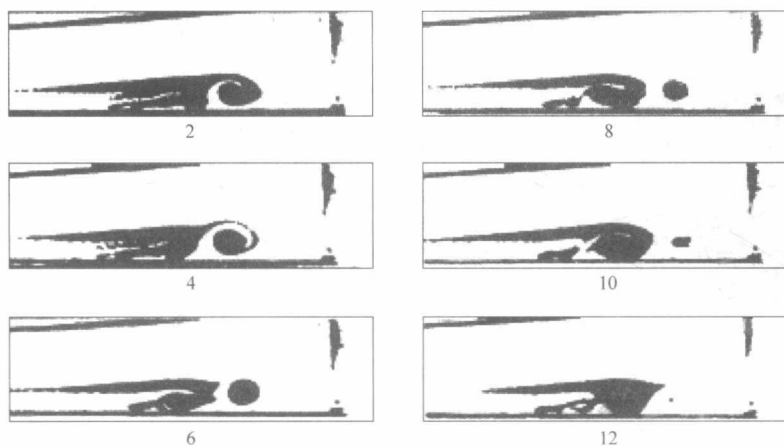


图 21.3 涡流系统振荡序列, Baker (1979J)

21.2.3 湍流边界层

在做表面流动可视化时, 马蹄涡流的印记总会留在壁面上。图 21.4a~c 显示了壁面流动和 C_p 分布, 其中 $Re = 3.4 \times 10^4$, $D/\delta_B = 3.9$, $H/D = 1, 3, 5$ 。三个 H/D 值对应的不同马蹄形图案是相似的。然而, 近尾流中肾形图案, 在 $H/D = 1$ 时是宽间距, 在 $H/D = 3$ 时是窄间

距, $H/D=5$ 时又变为合并的块。

Taniguchi 等 (1981Ja) 也测量了静压, 并绘制了图 21.4a' ~ c' 中的等 C_p 曲线。 C_{pmin} 的“小岛”对应观察到的肾形图案。对测试的三个长细比, 在上游侧都存在逆压梯度。下游 C_p 曲线并不对应表面可视化图形。这可能是由马蹄涡流被带向下游时从壁面移开造成的。Sakamoto 和 Arie (1983Ja) 认为 $H/D=1$ 时的肾形模式代表弓形涡的附接, 其对称地脱落。后面将对此假说进行讨论。

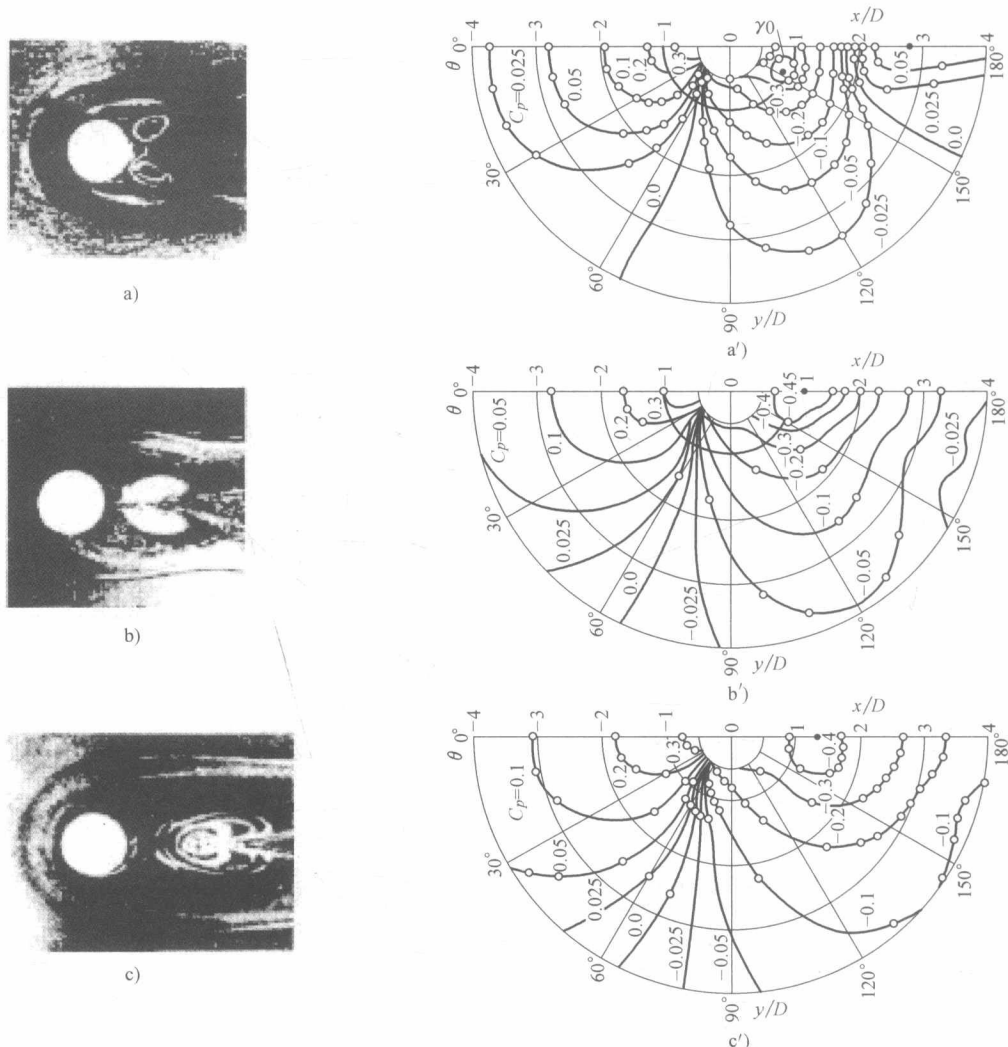


图 21.4 表面可视化和壁面上的测量等值线 Taniguchi 等 (1981Ja)

a)、a') $H/D=1$ b)、b') $H/D=3$ c)、c') $H/D=5$

图 21.4 中定义的时间平均湍流的马蹄涡流印记是一种假象, 实际流动是不稳定的湍流。图 21.5a 展示在圆柱上游子午面上的烟可视化图形。对 $H/D=1.75$, 且 $Re=7.6 \times 10^3$ 、 $D/\delta_B=2.5$ 短时曝光 (1/500s) 揭示了典型的湍流流动的高度不规则小尺度涡结构。然而, 相同流动的长时曝光 (1/15s) 展示了图 21.5b 中模糊的马蹄涡流图像。这表明湍流马蹄涡流仅间歇性地存在, 并且可以被量化为时间平均现象。

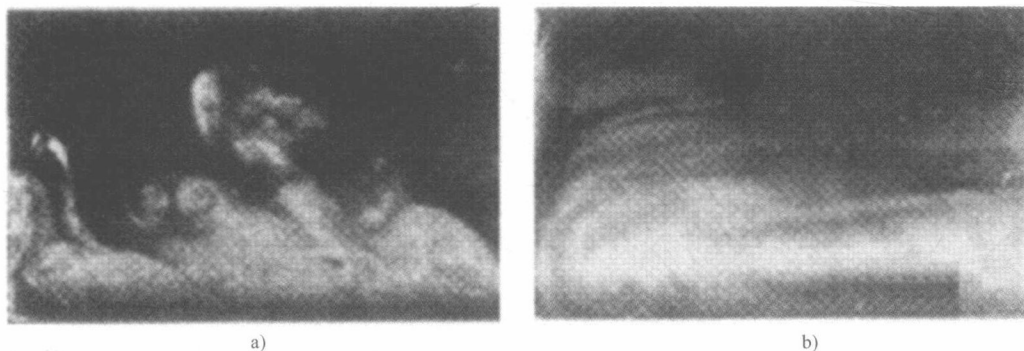


图 21.5 $H/D=1.75$, $Re=7.6\times 10^3$ (流动从右至左) 时, 马蹄涡流的烟可视化图, Baker (1980J)

a) 瞬间 1/500s b) 1/15s

Belik (1973J) 测量了圆柱上游子午面上的 C_p , 其中 $H/D=3.3$, $D/\delta_B=2$, $3.6\times 10^4 < Re < 2.2\times 10^5$ 。图 21.6 显示了 C_p 分布 (点), 下式给出二维势流流动的理论 C_p (曲线)

$$C_p = 2\cos(2\theta)(2r/D)^{-2} - (2r/D)^{-4} \quad (21.1)$$

式中, r 和 θ 是极坐标。试验点和理论曲线的偏离是由壁面边界层分离造成的。试验点的下沉处对应主马蹄涡流的轴线位置。这点被 Eckerle 和 Awad (1991J) 所证明, 他们在子午面同时进行了流动显示、热线和压力系数测量。Belik (1973J) 也估计了边界层从圆柱分离时的距离。相对分离距离范围为 $0.45 < x_s/D < 0.65$ 。

从平均剪切应力和子午面中湍流度的变化可以进一步了解马蹄涡流系统的性质 Dargahi (1989J)。图 21.7 显示了在 $c_t=0$ 处为分离区的开始, 对应图 21.8 中的 $Ti_{\max}$ 。马蹄涡流导致了壁面和 $\tau/\tau_m = -1.5$ 处的回流速度。强剪切是桥墩上游河床侵蚀的主要原因。

从边界层分离点到圆柱的距离与圆柱的高度和直径有关。当高度 H 大于壁面边界层厚度 δ_B 时, 分离长度 x_s 与 H 无关。Baker (1991J) 测量了分离长度 x_s 和涡流轴 x_{s1} 的位置, 其中 $Re=1.43\times 10^4$, $D/\delta_B=5.1$ 。图 21.9 证实了当 $H/D>1$ 时, x_s/D 和 x_{s1}/D 都与 H/D 无关。

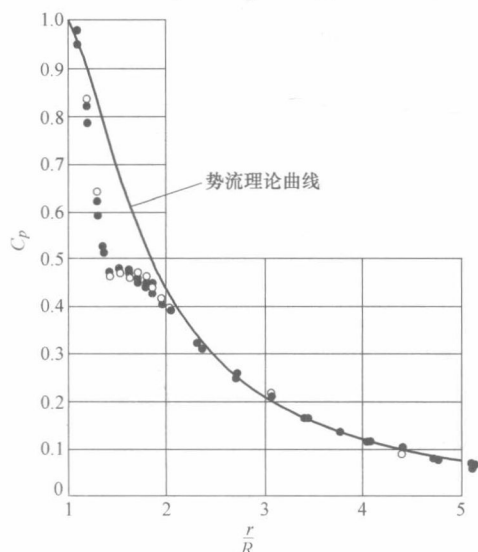


图 21.6 圆柱上游子午面上的压力系数分布 (实线为理论值), Belik (1973J)

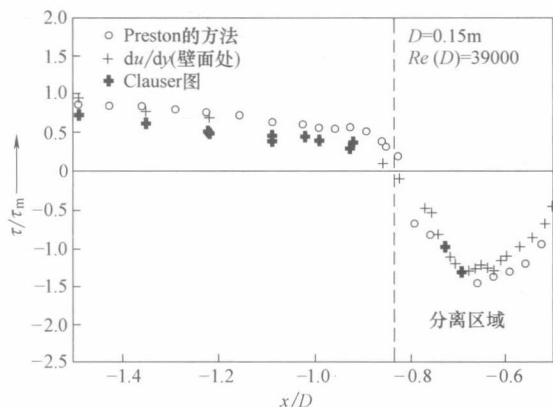


图 21.7 $Re=3.9\times 10^4$ 时, 子午面上剪切应力比分布, Dargahi (1989J)

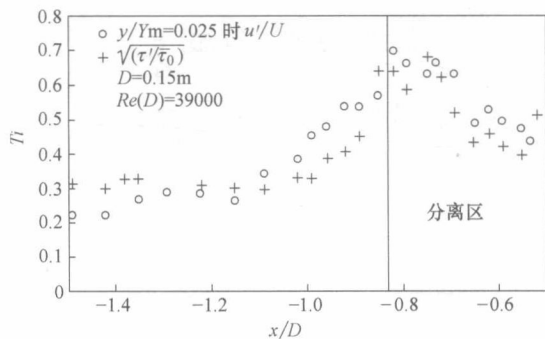


图 21.8 湍流度 (○) 和剪切率 (+) 的对比, Dargahi (1989J)

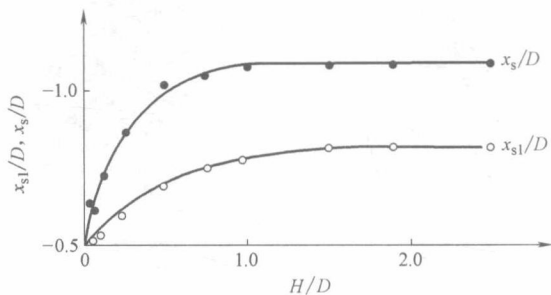


图 21.9 边界层分离至圆柱的距离, Baker (1991J)
 x_s —主分离 x_{s1} —二次分离

21.3 封闭测试段

21.3.1 定常层流尾流, L2 流域

在第 1 卷第 1 章中[⊖], 稳定封闭层流近尾流被称为 L2 流域。下面考虑低长细比对横跨封闭测试段的圆柱绕流的影响。Nisi[⊖] (1925J) 发现短圆柱绕流存在一种普遍的三维蠕流。他使用了一个“微型”风洞, 测试段为 $2.4\text{cm} \times 2.4\text{cm}$, 测试“圆柱”直径 $D = 2.75\text{mm}$, 长细比 $L/D = 8.7$ 。图 21.10a、b 分别展示了 $Re \approx 15$ 时的从侧面和展向的流动可视化结果。流动拓扑的特点主要表现为从圆柱分离的自由剪切层不在交汇点相遇, 即近尾流不封闭。Nisi (1925J) 认为由于“流出涡中心的空气必须从其他地方补给, 这表明运动不可能是纯二维的”。

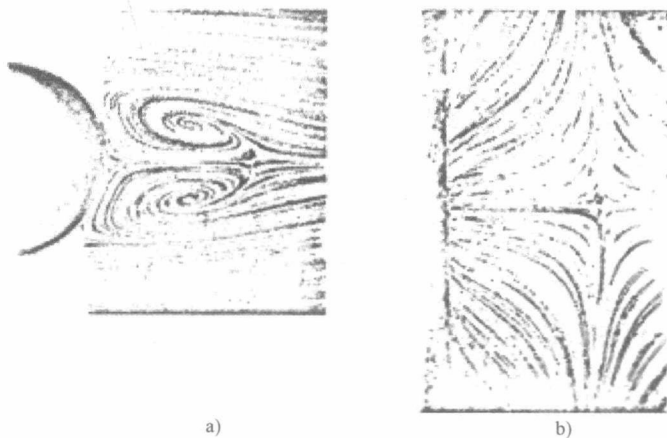


图 21.10 $Re \approx 15$, $L/D = 8.7$ 时流动显示, Nisi (1925J)

a) 跨过近尾流 b) 展向

⊖ 流域的通用缩写附录中给出。

⊖ 按照现在日本人名字的拼写, 应该为 Nishi。