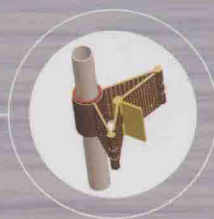


科学基金“段塞内流与剪切外流共同作用下
振动响应实验研究”(11502220)资助

*Suppression Devices of Vortex-Induced
Vibration of Marine Risers*

海洋钻采管柱 • 涡激振动抑制装置

朱红钧◎著



科学出版社

内流与剪切外流共同作用下
究”(11502220)资助

海洋钻采管柱涡激 振动抑制装置

朱红钧 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对海洋油气钻采管柱在波流环境下不可避免地存在涡激振动这一问题,阐述诱导海洋立管涡激振动的机理,总结国内外学者在涡激振动抑制方面的研究进展,重点对笔者近年来设计的涡激振动抑制装置进行系统介绍和总结归类。

本书可作为船舶与海洋工程、海洋工程与技术、海洋油气工程等海洋工程技术类专业的高年级本科生、研究生和教师,以及此类专业相关应用领域的工程技术人员的参考书,也可供从事海洋管柱安全研究、设计和运营的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋钻采管柱涡激振动抑制装置 / 朱红钧著. —北京:科学出版社, 2018.6
ISBN 978-7-03-057742-9

I. ①海… II. ①朱… III. ①海上平台-油管柱-振动控制-研究 IV. ①TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 125000 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 江 茂
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018年6月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 242 千字

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在新能源开发总量低、稳定性差、配套技术还不够成熟的当下，深水油气资源和海洋可燃冰的开发是缓解我国能源危机的重要举措。党中央提出了“海洋强国”“能源革命”的战略思想，海洋石油 981 的紧锣密鼓勘探、海洋石油 982 的出坞试水，南海神狐可燃冰试采，都表明了我国政府开发海洋资源的坚定决心。海洋油气、可燃冰、稀有金属矿藏的开采都需要借助海洋管柱来完成海面至海床的封闭式连通，具体涉及海洋钻井隔水管、海洋采油立管、抽汲立管等。这些海洋钻采管柱承载着安全输送钻井液、压裂液、采出油气流、固态流化开采的冰粒流、金属颗粒流等的重要使命，是海洋资源开采的关键纽带。然而，海洋管柱除了内部需要承载高压复杂多相流外，外部还承受着海洋波、流的载荷，服役环境异常恶劣。随着海洋开发向深水挺进，海洋钻采管柱的长径比迅速增大，其柔性特征急剧凸显，在波流的作用下其涡激振动表现出高阶、多模态参与的特征。一旦海洋管柱因振动发生疲劳失效，不仅会造成巨大的经济损失，还会给局部海洋生态环境造成不可逆转的灾难性破坏。因此，抑制海洋钻采管柱涡激振动是安全高效开采海洋油气资源的前提。

柱体绕流的研究可以追溯到 1878 年，斯特劳哈尔由琴弦振鸣实验定义了斯特劳哈尔数，到 1911 年冯·卡门提出卡门涡街，国内外学者针对涡激振动开展了大量的实验和数值模拟研究，也提出了一些涡激振动抑制手段，但至今未见关于涡激振动抑制装置的专门书籍。笔者在海洋管柱涡激振动领域的研究已积累逾 6 年，并设计了若干涡激振动抑制装置，出版本书意在整理这 6 年的研究成果，包括涡激振动机理、抑制装置结构及方法等，旨在揭示抑制海洋立管涡激振动的原理，为海洋钻采管柱结构设计、新型抑制装置研制提供参考。本书内容皆来自笔者所承担的国家自然科学基金、四川省青年科技基金、西南石油大学深水管柱安全青年科技创新团队等项目的研究成果，这些成果大多数已获国家发明专利授权或在 SCI 收录期刊发表。

全书共 8 章。第 1 章定义了涡激振动，分析了其利弊；第 2 章阐述了涡激振动抑制原理，综述了现有涡激振动抑制装置；第 3 章~第 8 章将笔者近年来设计的涡激振动抑制装置进行了分类介绍，分别为主动抑制装置、引流抑制装置、改变表面形状的抑制装置、尾摆式抑制装置、旋转式抑制装置和综合抑制装置。

本书得到国家自然科学基金青年科学基金“段塞内流与剪切外流共同作用下

柔性立管振动响应实验研究”(11502220)、四川省青年科技基金“多场耦合作用下海洋管柱振动特性研究”(2017JQ0055)、西南石油大学深水管柱安全青年科技创新团队(2017CXDT06)、西南石油大学科研启航计划“风-浪-流耦联作用场海洋立管振动响应与抑制研究”(2014QHZ003)、西南石油大学科研培育计划“内外流共同作用下海洋柔性立管的振动响应实验研究”(2014PYZ001)的资助,感谢国家自然科学基金委员会、四川省科技厅、西南石油大学对海洋钻采管柱振动响应研究的资助和对笔者多年研究工作的大力支持。笔者的研究生赵宏磊、高岳、赵莹、李帅、王萌萌、张爱婧、李国民、颜知音、胡昊、唐涛、赵洪南、姚杰、唐有波、王健、马粤、尤嘉慧、唐丽爽、廖梓行、孙兆鑫等参与了本书图表的整理工作,在此向他们表示感谢。

本书介绍的部分涡激振动抑制装置借鉴了日常生活中的结构,模仿了海洋生物形状,尝试了能量的同步收集,提供了较为大胆的创新设计,在实际应用前还需要进一步深入研究各装置的功效,并进行结构参数的敏感性分析。

限于学术水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

朱红钧教授

2018 年 2 月于西澳大学访学期间

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 涡激振动的定义	1
1.1.1 绕流及边界层	1
1.1.2 边界层分离及旋涡脱落	4
1.1.3 绕流形成的流体作用力	8
1.1.4 涡激振动的产生	11
1.2 涡激振动的利弊	11
1.2.1 涡激振动的危害	12
1.2.2 涡激振动的有利之处	13
参考文献	16
第 2 章 涡激振动抑制方法	17
2.1 涡激振动抑制原理	17
2.1.1 调整自身结构参数	17
2.1.2 改变边界层分离点	19
2.1.3 抑制尾涡的发展	20
2.2 现有抑制装置及分类	21
2.2.1 典型的涡激振动抑制装置	21
2.2.2 抑制装置的分类	27
参考文献	29
第 3 章 主动抑制装置	32
3.1 消耗外部能量的主动旋转控制杆	32
3.1.1 主动控制杆布置形式及装置结构	32
3.1.2 主动旋转杆抑制振动的方法	36
3.2 消耗内部能量的被动旋转控制杆	36
3.2.1 被动控制杆的结构布置	36
3.2.2 被动旋转杆抑制振动的方法	39
3.3 筛孔喷气式抑制装置	40
3.3.1 筛孔喷气式抑制装置结构	40
3.3.2 喷气抑制振动的方法	43

3.4 调节结构参数式抑制装置	43
3.4.1 可调参数装置的结构	44
3.4.2 调节参数避开共振的方法	46
3.5 调整附属组件间距的抑制装置	47
3.5.1 可调距的抑制装置结构	47
3.5.2 调节附属组件间距抑制振动的方法	50
参考文献	50
第4章 引流抑制装置	52
4.1 交错螺旋管引流抑制装置	52
4.1.1 交错螺旋管引流装置结构	52
4.1.2 螺旋管引流抑制振动的方法	53
4.2 内设导流涵洞的引流抑制装置	54
4.2.1 内设导流涵洞抑制装置结构	54
4.2.2 涵洞引流抑制振动的方法	57
4.3 开孔管引流抑制装置	58
4.3.1 开孔管引流抑制装置结构	58
4.3.2 开孔喷射抑制振动的方法	61
参考文献	61
第5章 改变表面形状的抑制装置	62
5.1 粗糙波状表面抑振装置	62
5.1.1 粗糙波状表面抑制装置结构	62
5.1.2 粗糙波状表面抑制振动的方法	64
5.2 自动变形响应抑振装置	64
5.2.1 自动变形装置结构	65
5.2.2 自动变形抑制振动的方法	66
5.3 球网抑振装置	66
5.3.1 球网抑振装置结构	67
5.3.2 球网抑制振动的方法	68
5.4 梭形整流罩抑振装置	68
5.4.1 梭形整流罩结构	69
5.4.2 梭形整流罩抑制振动的方法	71
5.5 减振罩装置	71
5.5.1 减振罩结构	71
5.5.2 减振罩抑制振动的方法	73
5.6 开孔螺旋列板抑振装置	73
5.6.1 开孔螺旋列板装置	74

5.6.2	开孔螺旋列板抑振方法	74
5.7	W 形列板抑振装置	75
5.7.1	W 形列板装置	75
5.7.2	W 形列板抑振方法	76
5.8	波状表面开槽管套	76
5.8.1	波状表面开槽管套式抑制装置	77
5.8.2	波状表面开槽管套抑振方法	78
	参考文献	80
第 6 章	尾摆式抑振装置	82
6.1	导流尾板抑振装置	82
6.1.1	导流尾板抑制装置结构	82
6.1.2	导流尾板抑制振动的方法	84
6.2	可旋导流干涉板抑振装置	84
6.2.1	导流干涉板装置结构	84
6.2.2	导流干涉板抑制振动的方法	87
6.3	尾部叶片随流摆动的抑振装置	88
6.3.1	尾部设可摆动叶片的装置结构	88
6.3.2	尾部叶片摆动抑制振动的方法	90
6.4	帘式波纹板抑振装置	90
6.4.1	帘式波纹板抑制装置结构	91
6.4.2	帘式波纹板抑制振动的方法	93
6.5	隔水板条抑振装置	93
6.5.1	可旋隔水板条装置结构	93
6.5.2	可旋隔水板条抑制振动的方法	96
6.6	伸缩尾摆抑振装置	96
6.6.1	伸缩尾摆抑振装置结构	97
6.6.2	伸缩尾摆抑制振动的方法	100
6.7	带尾桨可转分离盘抑振装置	100
6.7.1	带尾桨分离盘抑振装置结构	100
6.7.2	带尾桨分离盘抑振方法	103
6.8	背部设可旋叶轮的抑振装置	103
6.8.1	背部设可旋叶轮抑制装置结构	103
6.8.2	背部可旋叶轮抑振方法	106
6.9	风向标式分离盘抑振装置	107
6.9.1	风向标式分离盘装置结构	107
6.9.2	风向标式分离盘抑振方法	109

6.10 仿鱼鳍抑振装置	109
6.10.1 仿鱼鳍导流装置结构	109
6.10.2 仿鱼鳍涡激振动抑制方法	111
参考文献	112
第7章 旋转式抑振装置	113
7.1 可自由旋转叶轮抑振装置	113
7.1.1 可自由旋转叶轮结构	113
7.1.2 自由旋转叶轮抑制振动的方法	115
7.2 可旋螺旋列板抑振装置	116
7.2.1 可旋螺旋列板结构	116
7.2.2 可旋螺旋列板抑制振动的方法	118
7.3 旋桨式抑振装置	118
7.3.1 安设压电片的旋桨式抑振装置结构	119
7.3.2 旋桨式同步发电与抑振方法	122
7.4 回旋镖式抑振装置	123
7.4.1 可转回旋镖抑制装置结构	123
7.4.2 可转回旋镖抑制振动的方法	126
7.5 可转五角叶轮抑振装置	126
7.5.1 可转五角叶轮装置结构	126
7.5.2 可转五角叶轮抑制振动的方法	128
7.6 六角开孔叶轮抑振装置	128
7.6.1 可旋六角开孔叶轮装置结构	128
7.6.2 可旋六角开孔叶轮抑制方法	130
7.7 非对称开孔十字叶轮抑振装置	130
7.7.1 非对称开孔十字叶轮装置结构	130
7.7.2 非对称开孔十字叶轮抑振方法	132
7.8 可旋笼式抑振装置	133
7.8.1 可旋笼式抑制装置结构	133
7.8.2 笼式叶片抑制振动的方法	135
7.9 弧形翅片抑振装置	136
7.9.1 可旋弧形翅片抑制装置结构	136
7.9.2 可旋弧形翅片发电及抑振方法	138
7.10 S形列板抑振装置	138
7.10.1 可拆装S形列板装置结构	138
7.10.2 可旋S形列板抑制方法	142
7.11 复合扰动式抑振装置	142

7.11.1	复合扰动式抑制装置结构	142
7.11.2	复合扰动式抑制振动方法	144
7.12	轴向滑移叶轮对抑振装置	145
7.12.1	轴向滑移叶轮对装置结构	145
7.12.2	轴向滑移叶轮对抑制方法	148
7.13	旋转压电片抑振装置	149
7.13.1	旋转压电片装置结构	149
7.13.2	旋转压电片发电及抑振方法	152
7.14	摆锤式抑振装置	152
7.14.1	受冲可旋摆锤装置结构	152
7.14.2	可旋摆锤抑制振动的方法	154
	参考文献	155
第8章	综合抑振装置	156
8.1	螺旋杆与分离盘协同抑振装置	156
8.1.1	螺旋杆与分离盘协同抑制装置结构	156
8.1.2	螺旋杆与分离盘协同抑制振动的方法	159
8.2	带旋转叶片的螺旋列板抑振装置	160
8.2.1	带旋转叶片的螺旋列板装置结构	160
8.2.2	带旋转叶片螺旋列板抑振方法	162
8.3	可旋变孔径波状孔板抑振装置	163
8.3.1	可旋变孔径波状孔板抑振装置结构	163
8.3.2	可旋变孔径波状孔板抑振方法	165
8.4	调配绕流驱动旋转杆旋转装置	166
8.4.1	调配绕流驱动旋转杆旋转装置结构	166
8.4.2	调配绕流驱动旋转杆旋转的抑振方法	170
8.5	开窗引流与旋摆结合的抑振装置	171
8.5.1	开窗引流与旋摆结合的装置结构	171
8.5.2	开窗引流与旋摆结合的抑振方法	175
	参考文献	177

第1章 绪 论

海洋钻采管柱主要以圆柱体的形式暴露在海洋波、流中，在常见的波、流速度下，管柱后方会出现不规则脱落的旋涡，引起周期性的或非线性的振动，对结构的服役寿命构成了威胁。本章重点阐述涡激振动的产生原因及其利弊。

1.1 涡激振动的定义

涡激振动顾名思义是旋涡激发的振动，本节即从旋涡是如何产生的、又如何激发的振动来对该物理现象进行定义。

1.1.1 绕流及边界层

涡激振动是流体从结构物外表面掠过引起的，属于外部绕流，与管道内部流存在流动空间上的本质区别。

1.1.1.1 绕流

日常生活和实际工程中，绕流现象随处可见，如风吹过电线、绕过烟囱、越过山丘，飞机、汽车、火车前行时引起的空气相对流动，水流绕过桥墩、船舶、水下航行器，冷、热流体介质绕过换热管束，固体颗粒、液滴在空气中的沉降，飞行的羽毛球、乒乓球、足球，天空翱翔的老鹰，水中畅游的小鱼，等等。这些绕流大多属于高雷诺数流动，即雷诺数基本大于 10^5 。雷诺数(Re)定义为^[1]

$$Re = \frac{U_{\infty} l_t}{\nu} \quad (1-1)$$

式中， U_{∞} 为外部绕流无穷远处的来流速度，又称自由来流速度； l_t 为绕流结构物的特征长度； ν 为流体的运动黏度。常温常压下(101.325kPa、20℃)空气的运动黏度为 $1.48 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 、水的运动黏度为 $1.01 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，假设汽车以 60km/h 的速度行驶、特征长度为 1.5m，则相应的雷诺数为 1.69×10^6 ；假设轮船以 10km/h 的速度前行、特征长度为 10m，则相应的雷诺数为 2.75×10^7 。

雷诺数的物理意义是惯性力与黏性力之比，其中，惯性力可以表示为^[2]

$$F_i = ma \propto \rho l^3 \frac{l}{t^2} \propto \rho l^2 u^2 \tag{1-2}$$

式中， F_i 为惯性力； m 为流体质量； a 为运动加速度； ρ 为流体密度； l 为长度； t 为时间； u 为流体速度。根据牛顿切应力公式，黏性力可表示为^[2]

$$F_\tau = \mu A \frac{du}{dy} \propto \rho \nu l^2 \frac{u}{l} = \rho \nu l u \tag{1-3}$$

式中， F_τ 为黏性力； y 为坐标轴方向， du/dy 记为流体速度 u 沿 y 轴的梯度； A 为黏性力的作用面积。将式(1-2)除以式(1-3)，可得

$$\frac{F_i}{F_\tau} = \frac{\rho l^2 u^2}{\rho \nu l u} = \frac{ul}{\nu} \tag{1-4}$$

可见，雷诺数体现了惯性力与黏性力的竞争，雷诺数较大时，流体惯性力为主导作用力，黏性力很小。因此，达朗贝尔在 1752 年《试论流体阻力的新理论》一书中提出将大雷诺数流动的不可压缩流体简化为理想流体，即忽略流体的黏性，由此得到在高雷诺数流体中运动物体阻力为零的结论^[3]。该结论明显与实际不符，但他本人当时无法解释，因而被称为达朗贝尔佯谬。不考虑流体黏性的数学理论为势流理论，在 20 世纪前，人们主要运用势流理论解决流体的绕流问题。

直到 1904 年，普朗特在德国举行的第三届国际数学家学会上，提出了边界层的概念。他认为即使在高雷诺数下，从整体而言流体黏性力很小，但在紧贴绕流物体表面的薄层中，黏性力依然为主导作用力，必须要考虑黏性的作用；而在这一薄层外，黏性的影响迅速衰减，可以忽略不计。如图 1.1 所示，边界层内，流体沿绕流物体壁面法向的速度梯度较大，黏性力与惯性力处于相同量级，不可忽略，因此边界层内的流体必须用计入流体黏性的动量方程来求解；而边界层外流体速度变化很小，可以近似看成理想流体，适用于势流理论求解。普朗特的这一提法解释了绕流物体阻力的来源，也弥补了达朗贝尔佯谬的不足，在流体力学发展史上具有划时代的意义。

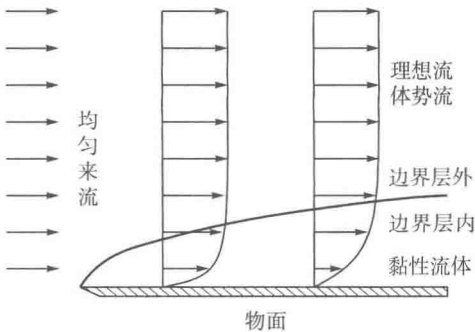


图 1.1 绕流流动分区

绕流物体绝大多数为钝体，即非流线型结构，流体绕至钝体尾部时会形成尾涡，这与绕流物体表面边界层的发展密切相关。

1.1.1.2 流动边界层的发展

流体刚接触物体表面时，仅有紧贴前缘的极薄层流体受到黏性吸附的影响，流速迅速减小，且与固体表面接触的流体与固体之间无滑移，速度为零。随着流体继续向后运移，受黏性影响而减速的流体层逐渐增厚，而该流体层内存在明显的速度梯度，即为前文所述的边界层。普朗特将边界层定义为从物体表面速度为零处沿物面法向直至速度为 $u=0.99U_\infty$ 的存在速度梯度的流体薄层，可见边界层的厚度已经明确给出。因此，流体绕经物体表面必然经历边界层逐渐增厚的过程。

如图 1.2 所示，流体掠过无限长的平板时，受黏性影响的流体不断增多，边界层内的速度梯度逐渐减小，尤其是靠近边界层外缘的速度梯度减小得更为显著，边界层向外层拓展，不断增厚，这就是边界层的发展。对于平板绕流而言，其绕流雷诺数定义为

$$Re = \frac{U_\infty x}{\nu} \quad (1-5)$$

式中， x 是流体掠过平板的长度，单位为 m。随着流体沿平板向后运移，其绕流雷诺数不断增加，当流体掠过平板一定长度后，其雷诺数达到临界雷诺数 (5×10^5)，边界层内会出现流态的转变，由层流边界层转变为紊流边界层，见图 1.2。但即使边界层内出现了紊流，紧贴固体表面的极薄层仍然只能做层流运动，称为黏性底层，或层流底层。

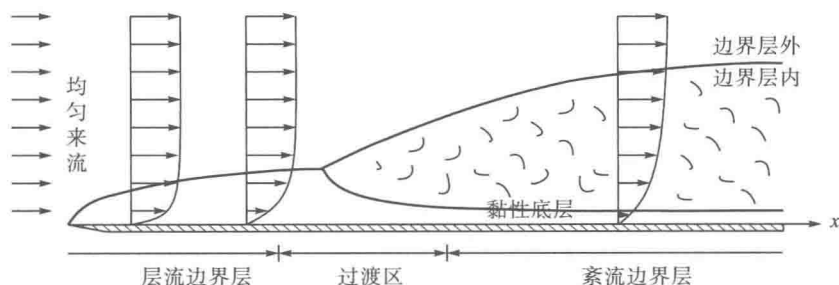


图 1.2 平板绕流边界层的发展

对于无限长的平板而言，流动边界层逐渐增厚，边界层内出现了流态的转变。这是由于物体表面足够长，给边界层提供了足够长的发展机会。然而，实际工程和生活中的绕流物体大多数为钝体，不可能提供无限长的发展空间，因而，边界层发展到一定程度后必然存在与物体表面分离的情况。

1.1.2 边界层分离及旋涡脱落

对于实际工程和生活中的有限尺寸绕流物体而言，边界层与物体表面分离现象十分普遍。

1.1.2.1 边界层分离的条件

边界层分离有两种可能，一种是由绕流物体形状决定的，当边界层发展到绕流物体的拐角处被迫分离，如棱柱、方柱的绕流，见图 1.3；另一种是物体表面尚有可供边界层发展的空间，但是由于绕流剖面 and 流动参数的变化，壁面流体速度梯度出现为零的转折点，随后引起边界层的分离。下面就第二种边界层分离情况，以任意一曲面钝体为例进行分析。

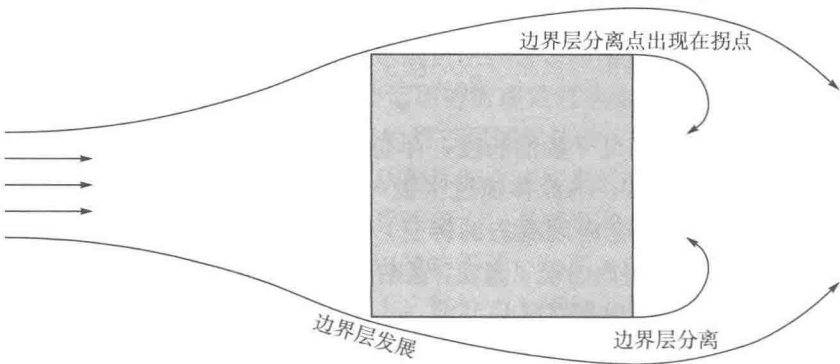


图 1.3 方柱绕流的边界层分离

如图 1.4 所示，来流以较高的雷诺数(Re 为 10^2 量级及以上)经过一曲面钝体。由于曲面钝体占据了流体的部分过流空间，造成了流体经过曲面钝体时过流截面积发生变化，在曲面钝体迎流截面最宽处(即最高点 M 处)，过流截面积降至最低。不可压缩流体在过流截面积减小时速度增大，而速度增大又会引起压强的减小，因此，在流动边界层自曲面钝体前缘发展到 M 点的过程中，流体绕流的速度逐渐增加，而压强相应降低，在 M 点出现最大流速和最小压强。由于这个过程中压强沿程下降，与常规流动的压强变化趋势一致，称为顺压梯度。而 M 点之后，由于钝体自身曲面变化的原因，过流截面积开始增大，流速逐渐减小，部分动能转化回压能，使得压强沿程不减反增。与此同时，由于流体黏性阻滞作用，流体动能逐渐减小直至消耗殆尽。图 1.4 所示的贴体坐标系下曲面钝体绕流的边界层运动方程可以表示为^[4]

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1-6)$$

式中, u 为沿曲面表面 x 方向的流速; v 为曲面表面法向 y 的流速; p 为流体压强; ρ 为流体密度; ν 为流体的运动黏度。等式右侧第一项表示单位质量流体受到的压强梯度力, 第二项表示单位质量流体受到的黏性阻力。由于 M 点之后压强逐渐升高, 为逆压梯度, 所以第一项压强梯度力为负值, 而黏性阻力与速度方向相反, 也为负值, 在两者的共同作用下, 流体速度不断减小。

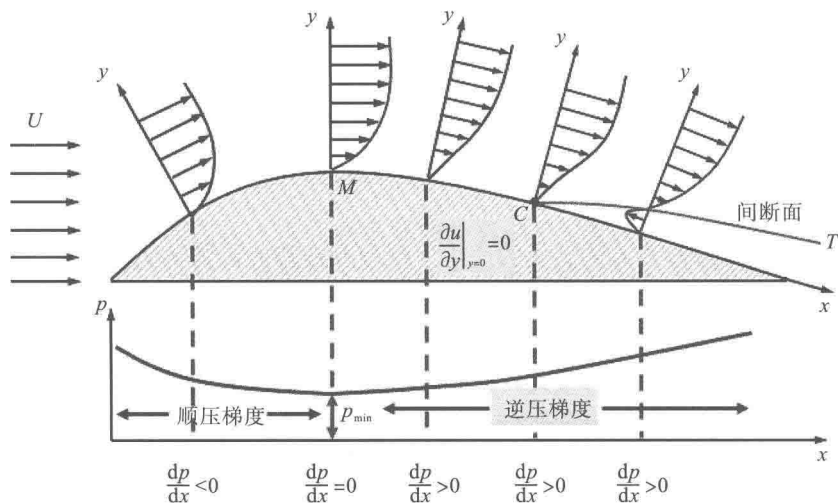


图 1.4 曲面钝体的边界层分离

由于越贴近壁面, 流体的黏性阻力越大, 所以在足够大的逆压梯度配合下, 壁面上的某一位置流体动能会率先消耗殆尽, 该处的法向速度梯度降为 0 $[(\partial u / \partial y)|_{y=0} = 0]$, 见图 1.4 的 C 点。此后, 流速为零的点将逐渐向远离壁面的方向转移, 将主流排挤得脱离物体表面, 因而产生了边界层的分离。而对于速度为零的边界以内的流体而言, 在逆压梯度的作用下, 流体从高压流向低压, 从而出现了与主流流动方向相反的回流。速度为零的分界面刚好把主流和回流间隔开, 因而称为间断面。由于边界层分离的起点是 C 点, 称 C 点为边界层分离点, 间断面内外流体流动方向相反, 存在强烈的剪切作用, 又称为剪切层。

所以, 第二种边界层分离的条件是存在足够大的逆压梯度, 边界层内的流体动能在绕流物体表面某处会减小为零。

1.1.2.2 旋涡泄放

海洋钻采管柱为圆柱体结构, 而圆柱体属于典型的曲面钝体, 前后表面对称。

如图 1.5 所示，流体绕经圆柱体同样存在边界层分离现象。由于间断面承受着主流与回流之间的剪切作用，很不稳定，易破裂形成旋涡，形成后的旋涡在主流带动下向下游迁移和泄放。

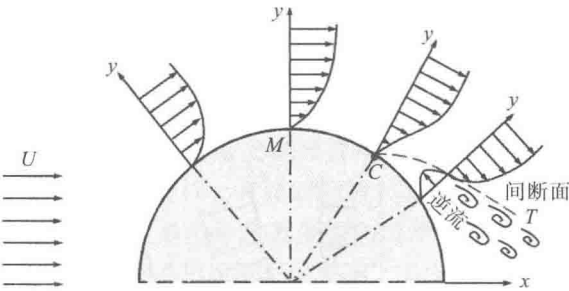
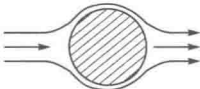
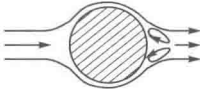


图 1.5 圆柱体表面的边界层分离

通常将绕流物体背流侧旋涡的产生、泄放和迁移的区域称为尾流区，即柱体两侧剪切层之间的区域。而旋涡脱落的形态主要与来流速度、流体黏度与绕流物体的特征尺度有关，而这三个物理参数组成的无量纲数即雷诺数，因此雷诺数常被用于划分绕流旋涡的脱落模式。如表 1.1 所列，为前人通过大量实验研究总结归纳的不同雷诺数均匀来流绕固定光滑圆柱的尾流旋涡脱落形式^[5]。在雷诺数小于 5 时，由于黏性力较大，圆柱后面不会出现边界层分离，但雷诺数大于 5 后，即开始出现分离现象。边界层分离即伴随着旋涡的形成，只不过在雷诺数小于 45 时，旋涡黏附在柱体尾部，未出现泄放，而在较宽的雷诺数区间 ($45 \leq Re < 3 \times 10^5$ 和 $Re \geq 3.5 \times 10^6$)，柱体尾部旋涡会以一定的周期交替地脱落，表现出时间的不稳定性 and 周期性。

表 1.1 固定光滑圆柱绕流尾涡脱落形式

雷诺数	旋涡脱落形态	说明
$Re < 5$		无边界层分离现象，不产生旋涡
$5 \leq Re < 45$		尾流中出现一对固定的对称旋涡
$45 \leq Re < 150$		尾流中的旋涡呈现周期性交替脱落的形式，形成稳定的层流涡街

续表

雷诺数	旋涡脱落形态	说明
$150 \leq Re < 3 \times 10^5$		$150 \leq Re < 300$ 时, 尾流向湍流过渡; $300 \leq Re < 3 \times 10^5$ 时, 形成周期性交替脱落的湍流旋涡, 称为亚临界阶段
$3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$		亚临界向超临界过渡, 分离点后移, 旋涡不再呈周期性, 绕流阻力显著减小
$3.5 \times 10^6 < Re$		重新恢复周期性交替脱落的湍流旋涡, 称为超临界阶段

美籍匈牙利力学家冯·卡门最早发现并提出了周期性交替脱落的绕流旋涡, 后人为了纪念他的贡献, 将尾流区内周期性旋涡的泄放称为卡门涡街, 见图 1.6。卡门涡街在实际生活中也常被人们发现, 如图 1.7 即为美国宇航局拍摄到的风绕过岛屿后的卡门涡街。

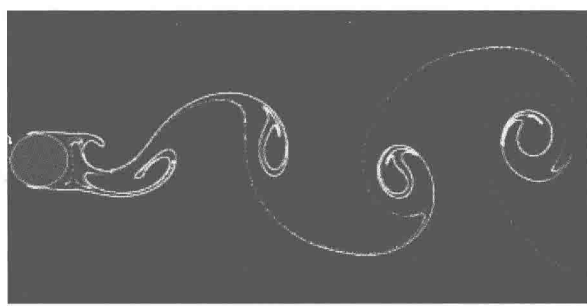


图 1.6 卡门涡街

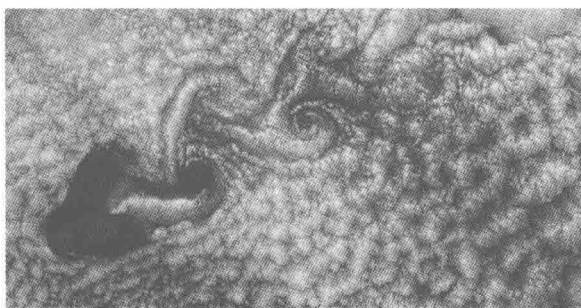


图 1.7 风绕过岛屿后的卡门涡街