

# 上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：基于斑海豹胡须水动力特性的  
远流场运动物体循迹机理研究

学生姓名： 范迪夏

学生学号： 5080109182

专    业： 船舶与海洋工程

指导教师： 付世晓

学院(系)： 船舶海洋与建筑工程

# 基于斑海豹胡须水动力特性 的远流场运动物体循迹机理研究

## 摘要

仿生学自诞生以来，得到了迅速发展。它在建筑，农业，军事等多个领域已经发挥了重要的作用，并获得了大量令人惊讶的成果。本文利用仿生学概念，以测试斑海豹胡须水动力感知能力的动物行为实验结果为基础，提出了通过特定结构物的水动力响应从而获取远流场运动物体信息的研究模型，并针对此问题抽象模型——多钝体绕流数值模拟与水动力实验展开的相应的研究工作。主要研究内容与成果如下：

1. 从针对斑海豹胡须的动物行为实验入手，分析抽象，建立起了此问题的水动力学研究模型；
2. 基于 Fluent 软件，分别使用了 SST  $k-\omega$  湍流模型与大涡模拟的方法，数值计算了二维单圆柱体与单椭圆柱体在均匀流中的水动力响应。分析了钝体绕流的漩涡生成机理，并为之后数值计算中前方结构物远流场漩涡的捕捉问题的解决打下了基础。
3. 对椭圆柱处于前方圆柱尾流区中不同的横向位置与纵向位置的模型的水动力响应进行了二维数值计算，分别从时域与频域的角度分析了椭圆柱的水动力表现，并以此得到各频率主导的水动力系数幅值，以此为基础分析了椭圆柱感知前方圆柱方位的方法。
4. 在数值计算的基础上，设计了后续相关实验装置与对应的实验工况。

**关键词：**仿生学，斑海豹，胡须，钝体绕流，大涡模拟，实验技术

# RESEARCH ON THE IDENTIFICATION OF THE FAR WAKE OF THE OBJECT IN MOTION BASED ON THE HYDRODYNAMIC CHARACTERS OF THE HARBOUR SEAL'S VIBRISSA

## ABSTRACT

Since the idea was first proposed, the biomimetic has been experiencing a period of surprisingly fast development, which has resulted in a large number of achievements in the fields of architecture, agriculture, weaponry, etc. In this paper, using the concept of biomimetic, it is established a research model for the hydrodynamic problem of the identification on the far wake of the object in motion using response of a certain structure, based on a series animal experiments of the harbor seal vibrissa detecting hydrodynamic information. Later, numerical simulation and experiment design were conducted on this abstract model, which is the model of the flow passing multiple bluff cylinders. The main research contents are as following:

1. Established a hydrodynamic numerical model based on the analysis of the harbor seal animal behavior experiment.
2. Conducted a numerical calculation on the 2-D problem of flow passing circular and elliptical cylinder, using SST  $k - \omega$  turbulent model and Large Eddy Simulation (LES) method. The vortex shedding mechanism of the bluff cylinders was evaluated and a reliable method for capturing the vortices in the far wake of the structure was found.
3. Conducted a series of numerical calculations on the 2-D problem of the hydrodynamic response of the elliptical cylinder placing in a variety of stagger positions towards the far upstream circular cylinder. The time-domain and frequency-domain response of the elliptic cylinder was studied and later the hydrodynamic force coefficient dominated by different frequencies was obtained.
4. Designed a hydrodynamic experiment on the scale model of the harbor seal vibrissa on the basis of the numerical results.

**Key words:** biomimetic, harbor seal, vibrissa, bluff cylinder, LES, experiment

## 目录

第一章 绪论 .....	1
1.1 课题的背景及研究意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	4
1.2.1 国内外鳍足类动物胡须及仿生传感器研究进展.....	4
1.2.2 国内外多钝体绕流研究进展.....	5
1.2.3 前人研究的不足和亟待解决的问题.....	5
1.3 本论文研究工作概述.....	6
1.3.1 研究思路和研究内容.....	6
1.3.2 本论文各章内容简介.....	6
1.3.3 本论文的创新性.....	7
1.4 本章小结.....	7
第二章 研究基础与研究手段概述.....	8
2.1 流体力学基础.....	8
2.1.1 流动控制方程.....	8
2.1.2 无因次参数.....	8
2.1.2.1 雷诺数.....	8
2.1.2.2 斯特劳哈尔数.....	9
2.1.2.3 升力、阻力、扭矩系数.....	9
2.1.3 层流与湍流.....	10
2.1.4 漩涡.....	11
2.1.4.1 流线.....	12
2.1.4.2 涡量.....	12
2.2 计算流体力学.....	12
2.2.1 离散方法.....	13
2.2.2.1 有限差分法.....	13
2.2.2.2 有限体积法.....	13
2.2.2.3 有限元法.....	13
2.2.2 流场数值计算的主要方法.....	14
2.2.3 湍流模型.....	14
2.2.3.1 雷诺平均法和 $k-\omega$ SST 模型.....	14
2.2.3.2 大涡模拟.....	16
2.3 实验流体力学.....	17
2.3.1 钝体绕流实验环境.....	17
2.3.2 流场显示方法——PIV 速度场测量方法.....	17
2.3.2.1 PIV 系统组成.....	17
2.3.2.2 PIV 测速原理.....	17
2.4 本章小结.....	18
第三章 单柱绕流的数值模拟.....	19
3.1 固定单圆柱绕流雷诺平均输运方法二维数值模拟.....	19
3.1.1 模型建立.....	19

3.1.2	网格划分.....	19
3.1.3	边界条件及初始条件.....	20
3.1.4	计算工况选择.....	21
3.1.5	模型比较.....	21
3.1.5.1	网格的影响.....	21
3.1.5.2	去流段的影响.....	28
3.2	固定单柱绕流大涡模拟方法二维数值模拟.....	29
3.2.1	模型特点.....	29
3.2.2	单圆柱水动力分析.....	29
3.2.2.1	圆柱周围的时均流场.....	30
3.2.2.2	圆柱周围的瞬时流场.....	33
3.2.3	单椭圆柱水动力分析.....	36
3.2.3.1	椭圆柱周围的时均流场.....	36
3.2.3.2	椭圆柱周围的瞬时流场.....	39
3.4	本章小结.....	41
第四章	双柱绕流的数值模拟.....	42
4.1	模型建立.....	42
4.1.1	斑海豹胡须动物行为实验的概述.....	42
4.1.2	数值模型的建立.....	50
4.1.2.1	模型建立.....	50
4.1.2.2	网格划分.....	51
4.1.3	数值验证——前方圆柱受力分析.....	52
4.2	结果分析.....	53
4.2.1	后方椭圆柱水动力分析.....	53
4.2.1.1	后方椭圆柱受力时域特性.....	53
4.2.1.2	后方椭圆柱受力频域特性.....	68
4.2.1.3	后方椭圆柱各频率下力系数成分.....	79
4.2.1.4	后方椭圆柱各频率下力系数成分云图分析.....	86
4.2.2	后方椭圆柱典型流场分析.....	92
4.3	本章小结.....	103
第五章	斑海豹胡须实验设计.....	104
5.1	装置介绍.....	104
5.1.1	装置组成.....	105
5.1.2	试件与传感器连接夹具设计.....	107
5.1.3	中心支架.....	110
5.2	工况设计.....	111
5.3	本章小结.....	114
第六章	总结与展望.....	115
6.1	本文的主要研究成果.....	115
6.2	研究工作的展望.....	116
	参考文献.....	118
	谢辞.....	122

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的背景及研究意义

仿生学（Bionics）一词于 1960 年由美国科学家 J.E.Steele 首先提出，其科学内涵旨在通过观察，研究自然界动植物各种各样的生存本领，包括这些生物本身特殊的整体构造、器官形式、运动模式，甚至体内的各种物理、化学的代谢过程、能量的传递、信息的储存与传播等，从而寻找，并模仿它们这些“与生俱来”的特殊生存技能，并将其利用在科学技术的研究与开发中，从而向科学界与工业界提供新的设计思想，工作原理和系统架构。

尽管作为一门新兴学科，从仿生学的诞生、发展，到现在只有短短几十年的时间内，但是它已经受到了科学界与工业界广泛的关注并被使之于重力，故得到的研究成果已经非常可观。比如建筑领域中，通过模仿贝壳，结构建筑师成功设计与修造了美观而实用的大跨度薄壳形的建筑形式，如图 1-1；又如在军事领域中，通过模仿海豚皮肤的沟槽结构并运用在潜艇与舰船设计理念之中，成功降低了航行阻力最多至 40-60%，而在大幅提高了航速的同时还起到了减低了噪音的效果<sup>[1]</sup>。可以说仿生学的问世开辟了独特的技术发展道路，也即向生物界索取蓝图的道路，它大大开阔了人们的眼界，显示了极强的生命力。



图1-1 贝壳仿生建筑——中国国家大剧院

在许多水生动物的漫长进化过程中，为了更好地探知周围的环境，追寻猎物，躲避天敌等，发展起来各式各样的令人惊讶的感知方法以及相配合的感知器官。它们大致能分为两大类，即“主动式”感知系统和“被动式”感知系统。比如海豚就进化出了强大的“主动式”的感知系统——声纳系统，从而使之能在各式各样的环境中（对比于其他一些动物，尤其是在黑暗浑浊的水域中）能自由地行动<sup>[2,3]</sup>。而相对于“主动式”的感知系统，一些水生动物也进化出了一系列强大的“被动式”的感知系统，比如鲫科鱼类通过侧线器官从而来获取水中压力分布，进而感知水流速度，水流方向，身边障碍物等环境信息<sup>[4]</sup>，而以此为设计思路从麻省理工的 Michael S. Triantafyllou 研究小组<sup>[4-9]</sup>中诞生了新型的高效仿生阵列式水下压力传感器，如图1-2，并已成功地运用水下机器人的感知与超极控制之中<sup>[10,11]</sup>。

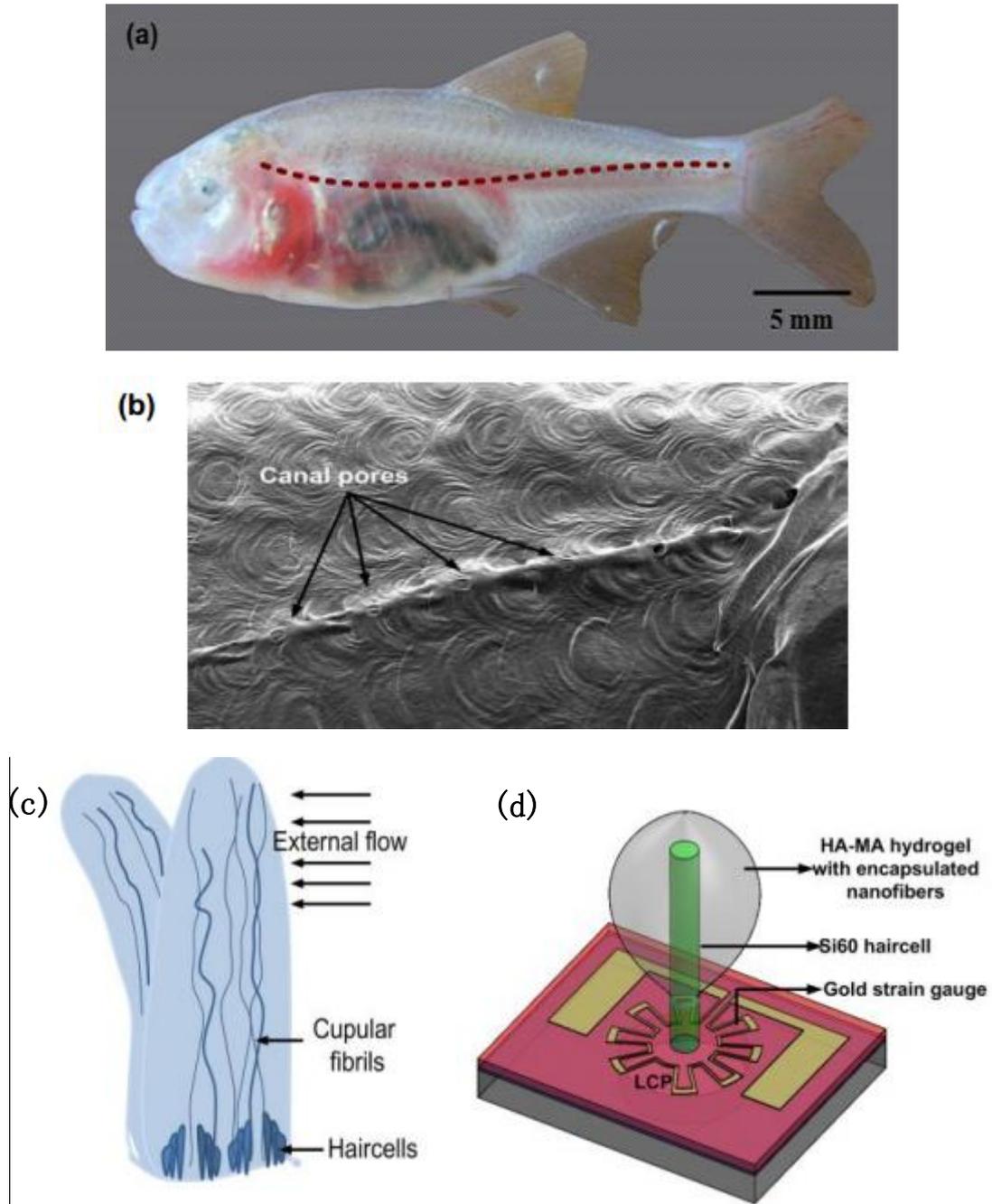


图1-2 由盲眼鱼（鲤科）侧线感知系统启发的阵列式压力传感器<sup>[10]</sup>。

(a) 盲眼鱼侧面图，红色点划线标出了侧线系统沿盲眼鱼的身体分布；(b) 盲眼鱼侧线系统中能感知压力梯度的“触角”；(c) 盲眼鱼侧线系统中单个“触角”与水流作用的原理图；(d) 压力阵列传感器的单“触角”原理图。

对于本论文研究的对象——斑海豹，海狮等鳍足类动物而言，任何“主动式”感知系统以及如鱼类侧线传感系统的“被动式”感知系统并没有在它们身上被科学家发现<sup>[12,13]</sup>，但惊讶的是它们依旧能在黑暗浑浊的环境中自由活动，甚至能掌握远方猎物的动向进而追捕猎物，显然此时鳍足类动物复杂精密的视觉系统并不能给他们提供很大的帮助<sup>[14-16]</sup>，这一现象立即引起了不少生物学家们的研究兴趣。

为此，Dehnhart、Hanke 等科学家针对斑海豹进行了一系列的动物行为实验<sup>[17-25]</sup>，实验过程中，除了斑海豹胡须主动式触碰识别物体的灵敏度让人吃惊<sup>[17]</sup>，另一种令人惊奇的“被

动式”的胡须感知功能被研究者发现，在实验中，尽管斑海豹的视觉与听觉系统等被实验人员完全阻碍，但仅仅通过其胡须与水流之间的相互作用，斑海豹就成功完成了一系列辨别物体<sup>[18, 19, 21]</sup>，追寻水下机器人等任务<sup>[20, 22, 23]</sup>，而进一步的研究已经证实，胡须系统在许多鳍足类动物在黑暗中行动，追寻猎物，感知环境的最重要手段之一<sup>[24, 25]</sup>。



图1-3 斑海豹面部胡须分布，上图为实验中的雌性斑海豹 Rosi<sup>[17]</sup>

鳍足类动物胡须“神奇”的感知能力不仅引起了生物学者的关注，更为相应的用于水下机器人外界流场感知的仿生传感器的设计与研究带来了巨大的灵感。麻省理工大学，哈佛大学，新加坡国立大学等研究小组相继以此为基础设计了一系列胡须仿生传感器<sup>[26-29]</sup>

尽管此类胡须式仿生传感器的研究与开发在探知前方均匀来流的工作中已经取得了一定的成绩，但事实上，鳍足类动物胡须感知能力更常常被用于长距离移动物体定位，尤其是斑海豹通过辨别其主要食物——鱼游动在自身尾流场中留下的某种信息来跟踪并捕捉目标<sup>[30]</sup>。而进一步的实验也证实了这个想法斑海豹等鳍足类动物有能力通过自己胡须的感知水流中的信息来推测出前方物体的大小，形状，甚至运动形式（包含方向，速度等）<sup>[18, 19, 21]</sup>。这为后续功能更强大的仿生传感器的研究开发指出了一条相应的路线，通过某种特定形状和大小的结构（一如斑海豹胡须形式）的力学响应来联系其外部水动力环境的情况，进而推测出远方来流场处的目标信息。

在此背景下，本论文通过解读相关斑海豹动物行为实验，把握胡须水动力学研究重点，即而抽象出相关数值计算与实验研究模型，即后方特定结构物在前方物体远流场尾流中的响应的多钝体绕流问题。通过系统性地研究，从而尝试寻找出斑海豹鳍足类动物通过胡须系统感知外界环境与相关运动物体循迹机理，并为之后的新型仿生传感器的设计与开发提供科学的依据。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 国内外鳍足类动物胡须及仿生传感器研究进展

过去 20 年间，生物学界对以斑海豹为代表的鳍足类动物进行了一系列相关的动物行为实验，为揭示斑海豹感知周围环境，处理获得信息的机理做出了重要的贡献。之后随着越来越多的实验结果的公布，仿生学家与水动力领域，微传感器领域的专家合作，也开始关注于斑海豹胡须所表现出的神奇特性，并期望以此为蓝本开发出新型的胡须式传感器运用于新一代水下机器人之上。下面将根据时间顺序，简要介绍斑海豹生物实验与相关已经取得一定传感器的开发。

Dehnhardt G. 和 Kaminski A.<sup>[17]</sup> 首先对斑海豹的胡须进行了实验，他们研究了一只雄性和一只雌性斑海豹在丧失视觉能力的条件下（使用黑布条蒙住实验对象的眼睛），其通过主动触碰来分辨圆形盘子的直径的能力。运用韦伯定律（Weber Fraction）分析实验结果，他们最终得出结论，斑海豹的胡须的灵敏度（主动触碰并识别物体的能力）与灵长类动物的手掌的触碰感知物体的能力在同一个水平。

Dehnhardt G., Mauck B. 等人<sup>[18]</sup> 开始对斑海豹胡须水中物体识别能力开始了最初的研究。在相关实验中，两只斑海豹分布用眼罩蒙住了双眼，用耳机遮住了耳朵（耳机中同时还播放着干扰的噪声），研究人员使实验小球在斑海豹头部前方的不同位置，以不同幅值不同频率进行正弦形式的上下振动从而激起水波供斑海豹感知。实验结果发现，斑海豹有能力来识别水中简单物体的不同运动的形式，同时研究还发现随着振动物体的振动频率，振动最大速度的提高以及振动最大幅值的减小，斑海豹的识别正确性也相应提高。

Dehnhardt G., Mauck B. 等人<sup>[19-22]</sup> 在实验中开始训练斑海豹识别仿真鱼鳍，小型机器人等运动物体产生的尾流信息，从而来研究斑海豹其识别运动物体远方流场残留信息，追踪远方运动物体的能力。实验结果显示斑海豹有能力通过物体在流场中运动之后留下的尾流场中所包含的信息来进行物体大小，形状甚至物体表面粗糙度以及物体运动形式（运动方向和运动速度等）的明晰识别。

Hanke W., Wieskotten S. 等人<sup>[23,24]</sup> 开始对大量鳍足类动物，包括海狮科和海豹科等，的胡须（之前提及的实验仅限于斑海豹）都进行了类似的实验，并进行了对比。发现不仅仅斑海豹能通过其胡须进行水中物体的识别追踪，其他鳍足类动物亦有相应的功能。但是其他鳍足类动物，如海狮，其胡须识别能力较之斑海豹来说，相去甚远。同时实验中通过观察比较鳍足类动物胡须的微观结构时发现斑海豹胡须较之其他同类有着极其不同的外形形式。

Hanke W. 等人<sup>[33,34]</sup> 开始从水动力学角度来研究单根斑海豹胡须的水动力表现形式。他们通过直接模拟（Direct Numerical Simulation）的数值方法以及 micro-PIV 观察流场的实验方法仔细研究了斑海豹胡须形式结构（椭圆截面，波浪形外表式柱体）在均匀流中的水动力响应形式，并将之与一般钝体（圆柱，椭圆柱等）绕流的受力与尾流形式进行比较，发现斑海豹胡须形式的结构较之其他鳍足类动物的胡须形式（一般来说为圆柱形式）的结构能极大改变并破坏其尾流区漩涡的形成方式，继而大幅抑制振荡受力，降低涡激振动（Vortex Induced Vibration）的产生，即大大抑制了由于可能的涡激振动造成的背景噪声，从而提高了斑海豹水中识别与追踪物体的能力。

Beem H. 等人<sup>[35]</sup>通过单根斑海豹胡须放大模型在均匀来流中的强迫振动试验, 得到其升力与阻力系数, 并与相应圆柱体均匀来流中强迫振动的受力情况进行比较, 从定量的角度给出了斑海豹胡须形式的结构在抑制涡激振动方面的表现能力。

Triantafyllou 等人<sup>[27-30]</sup>开始将上述的动物行为实验的结构运用于新型仿生传感器的概念设计之中。他们的研究工作以 30:1 放大斑海豹胡须自激振动原型为基础, 设计开发并制作了新型的胡须仿生传感器的原型, 并在实验环境中建立起了传感器与来流速度, 来流方向的相应关系, 之后成功地安装于 CTD rosette 采水器的一侧, 完成了对自然环境中复杂来流信息采集的传感器效果实地测量验证。

### 1.2.2 国内外多钝体绕流研究进展

同时本文由斑海豹胡须远流场物体追踪抽象的模型——多钝体绕流的数值计算与实验研究由来已久, 最早可追溯到 Pannell, Griffiths 等关于飞机电线<sup>[31]</sup>以及 Biermann 和 Herrnstein 关于飞机机翼桁架<sup>[32]</sup>的研究。下面将简明扼要地对多钝体绕流的研究进展作一定的介绍。

Zdravkovich<sup>[36, 37]</sup>对均匀来流中双圆柱在不同排列 (stagger) 方式下的相互影响进行了综述, 在同一雷诺数之下, 较之单圆柱绕流, 双圆柱绕流, 由于会受到相邻圆柱各自的脱落的尾涡影响, 会使得双圆柱在受力以及涡脱模式等方面会有非常复杂与不同的变化。同时它对两个一样的串列布置的双圆柱定义了临界距离, 发现当无因次间距比大于 4 时, 后方圆柱的存在将不在影响到前方圆柱的流体受力表现。

Williamson<sup>[38]</sup>通过风洞烟雾示迹与水洞实验的染色示迹实验研究讨论了并列双圆柱与并列双平板后的近、远尾流区流场演化过程, 肯定了前人关于反相尾涡保持的现象, 推翻了同相尾涡保持现象, 提出了二次涡街等理论。同时指出了当无因此间距比小于 2.2, 并列柱体后尾流会呈现不对称流动。

郭明显等人<sup>[39-40]</sup>通过风洞实验分别研究了串列、并列和斜向安置三种排列以及不同间距下的相同双圆柱均匀绕流问题, 证实了临界间距点的存在, 而在这些间距点之间, 流态保持稳定直至超越临界点之后流场发生突变。

而关于多钝体绕流的数值模拟, 由于计算资源的限制, 其研究主要集中在低雷诺数区域。

Chang 等人<sup>[41]</sup>采用结合有限元法和有限差分法的组合方法, 即对圆柱临近区域使用有限元法, 而对其他区域使用有限差分法的计算方法对多圆柱的升阻力变化和其相对应的流程漩涡结构进行了数值研究。

邓见<sup>[42-44]</sup>利用分块耦合方法, 对串列双圆柱绕流进行了数值模拟, 主要分析了无因次间距比的变化对上下游圆柱升阻力系数的影响, 以及讨论了两圆柱脱涡相互演化竞争的现象。

### 1.2.3 前人研究的不足和亟待解决的问题

尽管对于斑海豹胡须问题的研究, 生物学家的研究已经持续了近 20 年的时间, 但是受困于当时的技术手段与研究者的个人背景, 前人的研究工作依旧没能清晰解答斑海豹胡须是如何感知水中信息从而感知远方运动物体。而对于以此为蓝本的仿生传感器也已诞生了几个原型设计, 尽管其已经在感知水流速度和水流方向等问题上有了—定的突破, 但是对于感知前方物体依旧无能为力。

生物学家的研究大多数局限于斑海豹感知行为模式的研究, 而对于仿生传感器的开发主要集中在斑海豹胡须形式的结构物的水动力特征, 故对于相关问题的流场特性的研究较少。虽然对于最终的传感器开发水动力学特征是我们需要直接关心的内容, 但是如果不能揭示胡须形式结构物与流体相互作用的机理, 就无法从根本上认识其水动力学特性的变化规律, 即很难找到胡须形式结构感知流场从而推断远方运动物体的原理, 更勿论利用其特点来开发新型仿生传感器。

而对于其抽象模型——多钝体绕流问题来说, 目前对于下游结构物在上游结构流场中的结构响应研究主要集中在多圆柱 (主要为两圆柱) 的相互响应, 即近流场问题。而对于远流

场问题的研究鲜有所见,而其中为数不多的涉及远流场问题的研究则集中在钝体绕流的远流场涡脱落与演化模式,并未涉及相关结构物在前方结构物远流场中的响应。

## 1.3 本论文研究工作概述

### 1.3.1 研究思路和研究内容

在前人研究的基础上,本论文将以 CFD 数值模拟为主要手段,进一步挖掘和揭示斑海豹胡须在进行识别与追踪远流场运动物体时的水动力特性与机理,并为之后的模型水动力试验做出铺垫。具体来说,本论文工作主要集中在以下三个方面。

1. 基于斑海豹胡须动物实验的结果进行数值与实验研究模型的抽象。斑海豹胡须感知水动力信息的机理是一个非常复杂的过程,至今还远没有被科学家所破解。对于本论文研究对象来说由于如数值模拟的计算机资源有限,实验传感器量程限制等问题的存在,我们并没有可能完整地模拟真实斑海豹感知系统以及其外界环境,故需要在研究初期对问题进行仔细考察,抓住问题的关键,进行一定的问题简化,进而得到适用于数值计算与实验研究两者的抽象模型。
2. 多钝体远流场绕流数值模拟方法探索。数值模拟是当前科学研究中一种不可或缺的方法。理论上来说它不受实验条件的限制,可以更自由地模拟所需工况。但是,由于数值模拟将连续的控制方程在空间和时间上离散,不可避免地引入了离散误差。同时,由于计算机资源极大的限制,数值模拟中往往需要对控制方程进行简化或加入相应的经验修正系数,由此也会引入误差。为此,任何数值模拟工作之前,都必须对数值模拟方法的准确性进行验证,以求尽可能准确地模拟物理事实。尽管钝体绕流的经典问题——圆柱绕流问题的数值模拟计算以积累了许多的经验,但是对于多钝体远流场的数值计算问题还未有人进行相关计算,因此在采用数值模拟方面对多钝体远流场的特性的研究与探讨之前,有必要对选用的数值模拟方面进行一定深入的讨论。
3. 斑海豹胡须水动力特性的远流场运动物体循迹机理研究。本论文以多钝体远流场绕流数值模拟为主要的研究手段,对海豹胡须典型椭圆二维截面进行数值模拟,以此来研究特定形式的结构对于远流场物体识别的机理,为之后的相关实验设计给出了一定建议,同时也为之后的传感器设计工作以及结构物在前方结构远流场中的响应做出相应的机理性工作做出铺垫。

### 1.3.2 本论文各章内容简介

本论文其余各章内容如下:

第二章主要就本论文涉及的基本的流体力学理论、相关的研究方法以及数值与实验模型的由来进行了简要的介绍。首先介绍了流体力学的基本理论,包括流动的基本形式、流体运动的控制方程和主要参数等。之后简明扼要地介绍了计算流体力学中的有限体积法、边界条件的类型、本论文涉及到的湍流模型等内容。最后对本论文实验设计中将采用的流体显示方法——PIV 流场测量进行了简要的阐述。

第三章首先基于 SST  $k-\omega$  湍流模型采用对雷诺数  $Re = 1000$  的圆柱绕流问题进行二维数值模拟,完成了网格收敛性工作,以及对于去流段等参数对于远流场尾涡捕捉的影响进行了研究。之后又采用大涡模拟 (LES) 方法对二维圆柱绕流,椭圆柱绕流的问题进行了数值模拟研究,对圆柱与椭圆柱,在本文中的雷诺数下其尾流场的时均分布与瞬时分布给出了深入分析,尤其是瞬时分布,对于各自泄涡的整个物理过程分布使用了涡量与流线追踪的方法给出了的解释。为之后的多柱体绕流问题打下基础。

第四章首先就斑海豹胡须动物行为实验和鱼游推进的水动力特点进行了介绍,并以此给出了本论文涉及到的抽象后的研究模型。之后在第三章工作的基础之上,采用大涡模拟 (LES)

方法对二维任意布置的两柱体绕流问题进行了数值模拟研究（前方为圆柱结构，后方为椭圆柱结构）。对方后椭圆柱的水动力响应分布从时域与频域两个角度给出了分析，发现了其不同于椭圆柱在均匀来流中的水动力响应的特点。在频域分析的基础上，通过傅里叶级数的算法成功提取了水动力系数中不同频率所主导成分的幅值，并依此为基础，使用差分拟合，绘制了相对前方圆柱不同横向纵向布置的椭圆柱水动力系数响应云图。此外并在所有工况中选取一典型工况对其椭圆柱周围瞬时流场涡量与压力分布进行了深入地阐述，就椭圆柱与来流中漩涡相互作用的物理过程给出了解释。

第五章在前文数值模拟的基础上，结合数值模拟的结果以及具体生物问题的抽象，设计了一套后续的斑海豹胡须形式结构物感知前方物体尾流场的实验。并就实验设备的整体结构，试件样式，试件与传感器连接方式等给出了详细的三维设计图纸，给出了中心支架的形式功能概念草图。同时在上述设计完成的基础之上，结合实验目的，实验条件等完成了相关实验工况设计。

第六章对全文的主要内容和结论进行了总结，并对后续研究工作进行了展望。

### 1.3.3 本论文的创新性

本论文以鳍足类动物斑海豹通过胡须获取水中信息，以进行识别与追踪远流场运动物体时的水动力特性为背景，在前人研究的基础上，围绕以斑海豹胡须结构形式典型椭圆二维截面在远流场物体尾流中的响应进行了数值模拟的研究，水动力实验的设计。本论文的主要创新点如下：

1. 根据斑海豹胡须动物行为实验，分析研究关键点，对问题简化。结合数值模拟与水动力实验的特点，成功抽象出合适的数值计算与实验研究模型；
2. 基于 $k-\omega$  SST 湍流模型，研究了二维数值模拟方法对于圆柱绕流远流场尾涡捕捉的适用性。研究表明，对于钝体绕流的远流场尾涡捕捉来说， $k-\omega$  SST 湍流模型并不适用，且与网格质量，计算步长关联不大；
3. 基于大涡模拟方法（Large Eddy Simulation），成功对远流场钝体绕流进行了数值模拟，对下游椭圆截面的力学与涡-固相互作用进行了研究，给出了特点形式的下游钝体在上游圆柱尾流场中的特点与水动力学特征；
4. 结合动物行为实验，数值模拟计算，以及实验室涡激振动实验机器人结构完成了斑海豹胡须形式结构物远流场物体识别水动力特性的实验设计。

## 1.4 本章小结

本章首先从仿生学发展，斑海豹等鳍足类动物胡须感知系统等介绍了本论文研究的背景。然后，系统地介绍了国外关于斑海豹胡须动物行为实验和相关仿生传感器以及多钝体绕流研究的进展，并对前人研究的不足和亟待解决的问题进行了探讨。最后，介绍了本论文的研究思路、研究内容和研究方法、本论文后续各章的安排，以及本论文主要的创新点等内容。

## 第二章 研究基础与研究手段概述

为了使论文能更完整地与系统地阐述所研究的问题,在真正进入本论文具体的研究工作环境之前,有必要对本次研究中所涉及的流体力学基础理论和所采用的数值模拟以及实验研究设计中将使用到相关基础技术进行一定的说明。本章将就以上内容进行介绍。

### 2.1 流体力学基础

#### 2.1.1 流动控制方程

流体一般是指气体和液体两相的总称,从微观上来说,它是由大量不断进行热运动(无固定不变的平衡位置)的分子构成的,故其有别于固体来说,基本的特征是它不存在着一定的形状和具有流动性。而其中研究流体的力学运动规律及其应用的学科即为流体力学。

一般说来,流体的主要力学特性表现为:连续性、粘性、可压缩性、热传导性,表面张力等。而针对本问题的研究的流体来说,将不考虑其可压缩性、热传导及扩散和表面张力。同时由于通常海豹在巡游或追捕猎物的过程中,一直潜在水下,故本论文研究过程中不考虑自由液面的因素,同时也是后续实验设计过程中需要考虑与消除的因素之一。

纳维-斯托克斯(N-S, Navier-Stokes)方程组自建立以来,其所涉及的大部分宏观上的流体力学概念都得到了基本验证,故其是现今描述流体运动的基本方程。N-S方程组包含了三大基本的物理规律,即质量守恒、动量守恒和能量守恒,以及对于流体的两大假设,即连续性假设和粘性假设。针对本论文的研究环境——不可压缩均质流体而言,不需要考虑能量守恒方程,通常只考虑质量守恒和动量守恒方程,两者的存在已能构成了封闭方程组,使问题得到求解。不可压缩粘性流的N-S方程组可以表示如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2-2)$$

式中 $x_i(i=1,2,3)$ 为笛卡尔坐标系的三个坐标; $u_i$ 为流程速度在 $x_i$ 方向的分量; $t$ 时间; $p$ 为压强; $\rho$ 为流体密度。

#### 2.1.2 无因次参数

相似理论是流体研究过程中广泛使用的方法,它的出现是为了研究流体现象中的个性与共性,多目标之间特殊与一般的关系。在实验研究中,只有模型和原型保持相似,实验条件与真实环境保持相似,才能由模型试验结果推算出对应的实际问题的结果。而两者保持相似的重要条件即对象的无量纲物理参数保持一致,故本节将对本论文中所涉及的一些主要的无因次参数作简要的介绍。

##### 2.1.2.1 雷诺数

在流体运动描述的众多无因次参数中,雷诺数 $Re$ 是一种可用来表征流体流动情况的无量纲数,更准确来说雷诺数 $Re$ 是流体力学中体现流体粘性影响的相似准数,故它是描述粘性流体运动的基本参数。具体来说,它反映了流体流动中惯性力与粘性力的比值,如下:

$$Re = \frac{\rho U^2 / L}{\mu U / L^2} = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}} \quad (2-3)$$

式中  $U$  为流体的特征速度； $L$  为物体的特征尺度； $\mu$  为流体的动力粘性系数（Dynamic Viscosity）， $\mu = \nu\rho$ 。

如上文所述，在粘性流动中，雷诺数 $Re$ 是决定性的相似准数，它的变化决定了粘性流动的流体形态等众多物理现象。例如在经典钝体绕流——圆柱绕流问题中：当雷诺数小时，即粘性力占主导，其对流场的影响大于惯性力，流场中流速的扰动会因之而迅速衰减，故圆柱尾流形式保持层流状态；但随着雷诺数增大时，惯性力开始成为主导，其对流场的影响也随之增加，流动也开始变得愈加不稳定，微小变化此时并不会衰减，反而容易得到发展与增强，进而形成不规则的紊流流场即湍流现象。当然，需要提及的一点是，由于现阶段实验条件所限制等多方面原因，很多情况下实验中所涉及的模型雷诺数将远小于实际情况中的目标雷诺数，因此相关的修正方法以及如何发展高雷诺数实验设备是流体力学实验研究的重点之一。

### 2.1.2.2 斯特劳哈尔数

在钝体绕流的问题中，人们发现物体在均匀流的作用下，尾部会形成周期性的泄涡现象这既是著名的卡门涡街（Karman Vortex Street）。而针对这个具有特征频率的圆周流体运动现象时，研究人员引入了以对象流速 $U$ ，物体的特征尺度 $D$ 和对象的泄涡频率 $f_{st}$ 组成的无因次参数，即斯特劳哈尔（Strouhal）数 $St$ ，如下：

$$St = \frac{f_{st}D}{U} \quad (2-4)$$

斯特劳哈尔数 $St$ 的出现成功将钝体绕流现象中的确定性，即环境流场速度与物体结构形式与流场中的流动分离与流动不稳定而导致的周期泄涡现象相互联系起来。需要说明的是，从 N-S 方程组出发，可以证明对于不可压缩流体来说，当不考虑重力场的影响（即无自由表面导致的两相流问题出现），流场只要满足雷诺数 $Re$ 相等，两流场为流动形式相似，即描述流动中周期性泄涡现象的斯特劳哈尔数 $St$ 也相等。

### 2.1.2.3 升力、阻力、扭矩系数

对于作用在物体上的流体力，为了研究的可比性，一般来说也采用无因次化的形式表示为力系数。根据力对物体的作用形式的不同，又可分为阻力系数、升力系数、扭矩系数等。

阻力系数 $C_d$ ，其定义如下：

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho U^2 A_{ref}} \quad (2-6)$$

式中， $F_d$  为物体由于流体作用所受到的阻力； $U$  为流体的特征速度； $A_{ref}$  为参考面积。

升力系数 $C_l$ ，其定义如下：

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho U^2 A_{ref}} \quad (2-7)$$

式中， $F_l$  为物体由于流体作用所受到的升力

扭矩系数 $C_m$ ，其定义如下：

$$C_m = \frac{2F_m}{\rho U^2 A_{ref} L_m} \quad (2-8)$$

式中， $F_m$  为物体由于流体作用所受到的阻扭矩。 $L_m$  为绕扭矩中心的参考长度。

### 2.1.3 层流与湍流

粘性流体的流动形态一般来说具有层流 (laminar) 和湍流 (turbulence) 两种状态<sup>[45]</sup>以及两者之间的过渡状态流动。在层流阶段中, 流体表现为分层流动, 即相邻两层流体间只作相对滑动, 流层间不存在横向混杂现象, 故宏观上, 流体表现为层次分明的特性, 而微观上, 流体质点运动轨迹线光滑而稳定。但对于湍流状态来说, 宏观上, 流体不再保持分层流动特性, 各流层之间相互混淆, 微观上流体质点运动转化为极不规则的随机运动。为此, 湍流也常被称作紊流或乱流。

对于粘性流体的流动形态的分类或转变来说, 可以用上一节中提及的无因次参数之一, 雷诺数来衡量。从上一节分解的公式已经得知, 雷诺数表达了粘性力与惯性力的比值。而当雷诺数相对较小时, 即粘性将占主导地位, 而流场中各种扰动因素会因大粘性力的存在而迅速衰减, 故宏观上, 流体表现为运动相对平稳, 即处于层流状态。而随着雷诺数的增大, 惯性力逐渐开始占据主导, 即惯性力对流场的影响开始大于粘性力, 此时流场中的扰动不仅不会衰减, 甚至即便是微小的扰动, 也有可能被放大, 从而形成紊乱、不规则的流场, 即流动处于湍流状态。对于本文研究对象之一的圆柱绕流问题, 图2-1清晰地显示了各阶段雷诺数下, 光滑圆柱在均匀流程中的尾流特征<sup>[46]</sup>。图中可以看到, 对于圆柱绕流的问题, 当雷诺数超过约300时, 尾流以全部转变为湍流, 而当雷诺数超过200时, 远处尾流区亦表现为湍流流动形式。自然界大多数问题都处于湍流流动形式, 故对于湍流的特征, 产生机理等问题吸引了了科学研究的极大注意。

湍流从本质上来说是一种高度复杂的、不可预测的三维非稳态、带旋转的不规则流动。及对于处于湍流流动的流体, 其各个物理参数, 如速度 (包括大小方向)、压力等都会随着时间与空间发生随机的变动, 从而变的不可预测。

从空间上来说, 我们可以把湍流看成是由不同尺度的漩涡叠加而成的流动, 而其中这些漩涡的尺度以及旋转方向等是随机出现的。对于其中的大尺度漩涡来说, 其存在主要取决于流场的边界条件, 一般来说, 其尺寸大致可以与流场的范围为同一尺度, 是引起低频脉动的原因; 而其中的小尺度漩涡的存在, 主要取决于流体粘性力, 其尺寸非常小, 有时甚至可能只有流场尺度, 即大尺度漩涡的千分之一量级, 它们是引起高频脉动的原因。当大尺度的漩涡在破裂后, 其会逐渐演变形成小尺度的漩涡, 而之后这些相对较小尺度的漩涡破裂后又又会形成更小尺度的漩涡, 以此类推。因而在一个充分发展的湍流区域内, 流涕各个漩涡尺度会在相当大的范围内连续地变化。在流场中, 由于边界作用、扰动及速度梯度的作用等, 新的漩涡又不断产生, 其中大尺度漩涡不断地从流动中获得能量, 而通过漩涡间的相互作用, 能量逐渐向小的漩涡传递, 直至最后, 在流体粘性的作用下, 小尺度的涡旋最终消失, 此过程即为动能不断耗散转化为流体的热能。但在同时刻, 新的漩涡亦在不断产生。故由于这种湍流运动的随机性, 其研究方法主要采用统计的方法, 即时间和空间尺度上的统计平均。

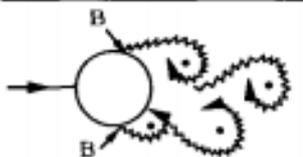
a)		No separation. Creeping flow	$Re < 5$
b)		A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
c)		Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
d)		Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
e)		Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$  Subcritical
f)		A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$  Critical (Lower transition)
g)		B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$  Supercritical
h)		C: Boundary layer com- pletely turbulent at one side	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$  Upper transition
i)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides	$4 \times 10^6 < Re$  Transcritical

图2-1各阶段雷诺数下光滑圆柱在均匀流程中的尾流特征<sup>[46]</sup>

#### 2.1.4 漩涡

流体的涡旋运动大量地存在与自然界之中，如大气之中的气旋，反气旋，龙卷，台风等。在流体力学中，我们常常会看见流体中急转所激起的螺旋形运动，我们将这种绕着某个轴不停转动所包含的区域称之为涡（vortex），而将存在此种运动形式的流体称为有旋流<sup>[47]</sup>。在

针对流体的涡旋运动的分析中,研究人员对漩涡的认知不同,对涡的表示形式也可以说是多种多样的,而这些不同表示形式突出的是漩涡运动不同的变化规律与物理意义。故在阐述本文的后续研究工作前,有必要对于本文所使用到的对于漩涡运动的描述方法——流线法与涡量法进行简要介绍。

#### 2.1.4.1 流线

相较于从拉格朗日看到流场问题的迹线,流线是欧拉法分析流动的重要概念,它形成了一条在某一个瞬时流体各点流动趋势的连续光滑曲线,曲线每一点的切线方向与该点上场的矢量方向重合,即与该点的流速方向。可以这么说流线表示的是某一瞬时流场中许多处于这一流线上的流体质点的运动情况,而不是某一个流体质点的运动轨迹(只有定常流动中,流线才为质点的轨迹,即迹线与流线此时保持一致。)

流线具有以下基本属性<sup>[45]</sup>:

1. 在运动液体的整个空间,可绘出一系列的流线,由此组成了流线簇,而由流线簇构成的流线图被称之为流谱。通过流谱,流场的空间分布情况将得到非常形象化的描述。流线簇的疏密程度直接反应了流速的大小:流线越密处流速速度越大,流线越稀疏处流速速度越小。
2. 同一时刻的不同流线,彼此不能相交。这是因为根据流线定义,如两流线相交,该交点处的流体质点流速向量应同时与两条不同流线相切,可得两个不同速度向量,这是在物理上不能存在的。
3. 流线不能是折线,而是一条光滑的曲线。这是因为流体是连续介质,故各个运动要素都是空间连续的函数。
4. 定常流动时流线形状不变,非定常流动时流线形状发生改变。而漩涡正式一种非定常流动,流线的变化过程恰反应了漩涡演化的过程。

#### 2.1.4.2 涡量

涡量也是表示漩涡的一种常用方法,主要是用来反映流体旋转特征与强度,其定义如下:

$$\Omega = \nabla \times V \quad (2-10)$$

式中, $\nabla$ 为哈密尔顿(Hamilton)算子; $V$ 为速度矢量;

需要注意的是涡量是一个矢量,它具有在 $x$ , $y$ 和 $z$ 三个方向的分量。对于本文所涉及到的二维问题来说, $x$ 与 $y$ 两方向分量为零,使用涡量的 $z$ 分量来表达漩涡强度,其中 $z$ 为负时表示顺时针旋转漩涡,即负涡量漩涡,反之 $z$ 为正表达了逆时针旋转漩涡,即正涡量漩涡的运动情况。

## 2.2 计算流体力学

对于流体力学的研究,研究人员常常采用基于近似分析和无因次分析以及经验公式的基础上建立的简化方程或者是通过对该对象的实验研究工作来揭示物理现象,解决工程问题。

对于实验来说,有时面对依赖于多个无量纲参数的流动,实验中要同时满足所有的无量纲参数就非常的困难了。比如水动力实验研究中雷诺数和弗劳德数的矛盾。在另外一些情况中,实验很难或者是几乎不可能进行。比如实验测量设备的存在有时会给流场带来巨大的扰动,或者有些物理量就目前的实验设备能力难以测量或者难以得到很好的精度等。

而数值方法随着电子计算机的出现变成了一种非常优良的,现实的替代方案。随着计算机的性价比以级数的方式增长。计算速度和存储能力得到了飞速的提高,数值方法在工程实

践中的地位变得越来越重要了，逐渐形成了流体力学的第三个分支——计算流体力学（Computational Fluid Dynamics），简称 CFD。

计算流体力学准确来说是为了得到流体力学微分方程的数值解，通过采用不同的离散方法，把原来的微分方程近似成一系列代数方程组，使其能在计算机上进行求解。在空间和时间的小域上应用近似公式，从而数值解在离散的空间上给出满足精度要求的数值结果。如果说实验流体力学的精度取决于测量手段，而 CFD 的精度则取决于离散的质量。

在实验流体力学中我们面对的许多困难，而在计算流体力学中可以得到圆满的解决。比如边界条件的模拟和尺度效应。在风洞中模拟汽车行驶过程，当空气运动时，真身环境中要求地板也应和空气一致的速度进行移动，这在实验中是基本不可能做到的，而至于更加复杂边界的模拟，这在实验流体力学中就更加困难了，但是计算流体力学中可以得到很好的灵活解决。此外，计算流体力学相较于实验流体力学，其还可以得到流场的非常详细的信息，这样有便于人们对流场从宏观上以及微观上有更加清晰的认识。

但是同样的是，计算流体力学也有其自己的缺点：计算流体力学的结果往往是数值结果，即近似解，因此再没有对应试验的基础上，人们很难对数值结果的可信性进行评价。

数值计算的误差在每一个环节都可能产生：

1. 模型误差：即实际流动和数学模型简化之间的误差。
2. 离散误差：即数学模型的离散数值解和代数方程组精确解之间的误差。
3. 迭代误差：即代数方程组迭代过程产生的与精确解之间的误差。

目前已有多种商业或开源 CFD 软件问世，比如商业软件 FLUENT、Phoenics、CFX、Star-cd 等和著名开源软件 OpenFoam 等。本论文所使用的为商业软件 Fluent 作为主要求解器。下面，将对本文所采用的数值计算方法进行介绍。

## 2.2.1 离散方法

### 2.2.2.1 有限差分法

有限差分法是偏微分方程（partial differential equation，简称 PDE）数值求解的最为古老的方法，是 Euler 在 18 世纪提出的。对于简单几何形体，这也是最简单的方法。

有限差分法的出发点是形成守恒型方程的微分形式，求解域为网格覆盖，对于网络中离散获得的每一个网格节点，通过将偏导数近似为节点函数值，从而有微分方程变为代数方程组的形式来近似原 PDE。每一个节点上都有一个代数方程，而方程的未知数是中心节点以及相邻节点上的变量值。

需要注意的是有限差分法理论上可用于任意网格，但是采用结构化网格最为方便也相对快捷，因为在结构化网格中，网格线可作为局部坐标系的作坐标线。

### 2.2.2.2 有限体积法

有限体积法的出发点是形成守恒型方程的积分形式，为从欧拉角度认识问题，求解域被分成若干连续的控制体，而在每一个控制体上满足守恒方程。将控制体的中心作为计算节点，计算该点上的各个物理量。而控制体边界上的函数值则采用节点函数值通过插值获得。这样结果是，每个控制体上都有一个代数方程，而方程的未知数是中心节点以及相邻节点上变量的值。

### 2.2.2.3 有限元法

有限元法在很多地方和有限体积法非常的类似，有限元法也将空间分成连续的控制体，但是通常采用非结构网格。有限元法的最明显特点是方程在整个域内积分之前被乘上了一个

权函数或者称为形状函数。如在最简单的有限元法中,每个控制体内的函数被假设成线性的,并且保证解在边界上的连续性。

### 2.2.2 流场数值计算的主要方法

一般来说,流场数值计算方法的基本过程是分别在空间上使用有限体积法或其他类似方法将计算域离散化,形成许多相互独立又互相有联系的小的体积单元。然后分别在每个体积单元上求解离散后的控制方程组。可以这么说,流场数值计算方法的本质就是求解离散后的控制方程组。而求解离散后的控制方程组的方法又可以大致分为分离式解法(segregated method)和耦合式解法(coupled method)两种。其中耦合式解法意在同时求解离散后化的控制方程组,联立方程组然后求解出各变量。所以说,当计算中流体的密度、能量、速度等各参数相互依赖时,宜采用耦合式解法,此时其相较于分离式解法具有一定的优势。但不得不说的是,总体而言,耦合式解法计算效率相对较低、内存消耗大,目前其主要应用范围集中在高速可压流动、有限速率反应模型等。而相对而言,分离式解法不需要直接解联立方程组,而是顺序地、逐个地求解各变量代数方程组。涡量-速度法和涡量-流函数法是两种典型的非原始变量法;而原始变量法包含的解法比较多,常用的有解压力泊松方程法、人为压缩法和压力修正法。

目前来说,工程上应用最为广泛的流场数值计算方法为压力修正法。压力修正法的实质是迭代法。在每一时间步长的运算中,先给出压力场的初始假定值,据此求出假定的速度场。再求解根据连续方程导出的压力修正方程,对假定的压力场和速度场进行修正。通过不断迭代,得出压力场和速度场的收敛解。压力修正法有多种实现方式,其中,压力耦合方程组的半隐式方法(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations,简称SIMPLE)应用最为广泛。SIMPLE算法由Patankar and Spalding<sup>[49]</sup>于1972年提出,是一种主要用于求解不可压流场的数值方法。SIMPLE算法自问世以来,在被广泛应用的同时,也得到了不断的改善和发展,其中最著名的改进算法包括SIMPLEC、SIMPLER和PISO算法等。更多关于各类算法的详情请参阅王福军<sup>[50]</sup>。

### 2.2.3 湍流模型

通过上文的介绍,我们已经知道尽管湍流流动是一种高度复杂的、不可预测的三维非稳态、带旋转的不规则流动,而对于湍流的数值模拟也一直是流体研究人员的重要研究课题之一。目前对于湍流的数值模拟方法主要分为三种,即雷诺平均方法,大涡模拟LES(Large Eddy Simulation)和直接数值模拟DNS(Direct Numerical Simulation)。对于第一个来说往往还要涉及湍流模型的概念,就是以雷诺平均运动方程与脉动运动方程为基础,依靠理论与经验的结合,引进一系列模型假设,从而建立起的一组描写湍流平均量的封闭方程组来描述湍流现象。而对于DNS直接数值模拟来说,相较于雷诺平均方法,其不需要对建立湍流模型,而是对于流动的控制方程直接采用数值计算求解。但是要获得湍流所有尺度的流动信息,对于空间和时间分辨率需求很高,因而计算量非常巨大,目前直接数值模拟只能计算雷诺数较低的简单湍流运动。大涡模拟是近几十年才发展起来的一个流体力学中重要的数值模拟研究方法。它区别于直接数值模拟和雷诺平均方法。其基本思想是通过精确求解某个尺度以上所有湍流尺度的运动,而对其中起较小作用的小尺度脉动则通过过滤函数过滤除。大涡模拟能够捕捉到RANS方法所无能为力的非稳态,非平衡过程中出现的大尺度效应,同时又克服了直接数值模拟由于需要求解所有湍流尺度而带来的巨大计算开销的问题。

#### 2.2.3.1 雷诺平均法和 $k-\omega$ SST 模型

雷诺平均法的思想在于不直接求解NS方程,而是求解时均化的雷诺方程RANS(Reynolds-average Navier-Stokes equations)。具体的做法为,将NS方程中的速度 $u_i$ 和压

力  $p$  表示为时间平均值和相对于这些平均值的脉动值两部分之和，即：

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + u'_i \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中  $\bar{u}_i$  和  $\bar{p}$  分别表示速度和压力的时间平均值， $u'_i$  和  $p'$  分别表示速度和压力的脉动值。将式2-13代入式2-1和2-2并对两端取时间平均，则可得到 RANS 方程，如下：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-12)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (2-13)$$

式中  $\bar{u}_i \bar{u}_j$  为雷诺应力项。现在引入流场中标量  $\phi$  的时均输运方程

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) - \bar{u}_i \bar{\phi} \quad (2-14)$$

式中  $\Gamma$  为广义扩散系数。

由式2-12, 2-13和2-14构成的方程组包含6个新增的雷诺应力变量和方程中原有的5个时均未知量 ( $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3, \bar{p}$  和  $\bar{\phi}$ )，导致方程组本身不封闭。为了从方程中求解平均流，必须首先设法建立关于6个雷诺应力的补充方程式来使方程组封闭。这就必须对雷诺应力作出某种假定，即建立应力的表达式，引入新的湍流模型方程，把湍流的脉动值与时均值等联系起来。目前的湍流模型多以大量的实验观测结果为基础，根据对雷诺应力做出的假定或处理方式不同，目前分为雷诺应力模型和粘涡模型两大类。

在涡粘模型方法中，引入湍动粘度 (Turbulent Viscosity)，或称涡粘系数 (Eddy Viscosity)，并将湍流应力表示成湍动粘度的函数。因此，整个计算的关键在于确定湍动粘度。

Joseph Boussinesq 首先提出了涡粘假定，建立了雷诺应力相对于平均速度梯度的关系，如下：

$$-\bar{u}_i \bar{u}_j = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2-15)$$

式中  $\nu_t$  为湍动粘度系数， $\delta_{ij}$  为 Kronecker delta 函数， $k$  为湍动能，等于  $\bar{u}_i \bar{u}_i / 2$ 。

引入 Boussinesq 的粘涡假定以后，计算湍流流动的关键就在于如何确定  $\nu_t$ 。而粘涡模型就是把  $\nu_t$  与湍流时均参数联系起来的关系式。依据确定  $\nu_t$  的微分方程数目的多少，粘涡模型包括零方程模型、一方程模型和两方程模型，其中两方程模型在目前的工程中使用最为广泛，包括标准  $k - \varepsilon$  模型，RNG  $k - \varepsilon$  模型，Realizable  $k - \varepsilon$  模型， $k - \omega$  模型和 SST  $k - \omega$  模型。

SST  $k - \omega$  模型由 Menter<sup>[52]</sup> 提出。它是一种结合  $k - \omega$  模型和  $k - \varepsilon$  模型的模型：在近壁面区域使用  $k - \omega$  模型<sup>[53]</sup>，在尾流区和自由剪切层使用  $k - \varepsilon$  模型<sup>[54]</sup>。SST 模型<sup>[55]</sup> 的方程组如下：

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\hat{P}_k}{\rho} - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k \nu_t^{SST}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2-16)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega \nu_t^{SST}) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2-17)$$

式中  $\hat{P}_k$  可表达为：

$$\hat{P}_k = \min \left[ v_t^{SST} \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), 10\beta^* \rho \omega k \right] \quad (2-18)$$

如果用 $\phi_1$ 表示 $k-\omega$ 模型中的任意变量,用 $\phi_2$ 表示 $k-\varepsilon$ 模型中的任意变量,则公式2-16和2-17中给出的对应的变量 $\phi$ 可表示为:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (2-19)$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2-20)$$

$$\arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \quad (2-21)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\sigma_{\rho \omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (2-22)$$

式中 $y$ 为距离最近壁面的垂直距离。

SST  $k-\omega$  模型的粘涡系数为:

$$v_t^{SST} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (2-23)$$

式中 $S$ 为应变率, $F_2$ 表示为:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2-24)$$

$$\arg_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \quad (2-25)$$

SST  $k-\omega$ 模型各个常量的值分别为 $\beta^* = 0.09$ ,  $a_1 = 0.31$ ,  $\alpha_1 = 0.4403$ ,  $\beta_1 = 0.075$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\sigma_{k1} = 0.85034$ ,  $\sigma_{k2} = 1.0$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 0.5$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 0.85616$ 。

### 2.2.3.2 大涡模拟

大涡模拟<sup>[56]</sup>LES(Large Eddy Simulation)是近30年来才发展起来的一种新型的紊流模型。其基本思想是对流体运动中起重要作用的大涡进行直接计算,对其中起较小作用的小尺度脉动则通过过滤函数过滤除并用亚格子尺度(subgrid scale,简称SGS)模型模拟。任意变量 $\phi$ 被表达出过滤后剩下的成分 $\tilde{\phi}$ 和亚格子尺度成分 $\phi'$ ,即:

$$\phi = \tilde{\phi} + \phi' \quad (2-26)$$

在对NS方程组进行过滤处理后,可得:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-27)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2-28)$$

式中,亚格子应力 $\tau_{ij}$ 可表示为:

$$\tau_{ij} = u_i u_j + \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (2-29)$$

本论文中采用了Smagorinsky-Lilly模型<sup>[57]</sup>,故亚格子应力 $\tau_{ij}$ 可表达为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{ij} \tau_{kk} = -2v_t^{LES} \tilde{S}_{ij} \quad (2-30)$$

式中,  $v_t^{LES}$  为亚格子湍流粘性, 其表达式如下

$$v_t^{LES} = \rho L_s^2 |\tilde{S}| \quad (2-31)$$

式中,  $\tilde{S} = \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}}$ , 而  $L_s$  为亚格子混合长度, 表达式如下:

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta) \quad (2-32)$$

式中  $\kappa = 0.41$  为 von Karman 常数,  $C_s = 0.1$  为 Smagorinsky 常数。

关于湍流模型以及大涡模拟方法更多详细的解释, 请参详文献<sup>[58]</sup> 《Three-Dimensional Effects of the Flow Normal to a Flat Plate at a High Reynolds Number》。

## 2.3 实验流体力学

### 2.3.1 钝体绕流实验环境

为了制造均匀流的环境, 一般来说钝体绕流的实验环境可分为水动力实验与气动力实验, 本论文涉及的实验设计为前者, 即水动力学实验。而在钝体绕流水动力学实验中最常用到的分别为两个实验设施——循环水槽与拖曳水池。前者为结构物不动(固定绕流)或在小范围运动(自激运动或强迫运动)而流体运动; 后者为在静止水域内, 通过拖曳设备(如拖车, 直线电机等形式)以恒定速度拖曳结构物, 形成均匀来流形式。

### 2.3.2 流场显示方法——PIV 速度场测量方法

#### 2.3.2.1 PIV 系统组成

PIV (Particle Image Velocimetry) 粒子图像测速法技术<sup>[59-61]</sup>是七十年代末发展起来的一种瞬态、多点、无接触式的流体力学测速方法, 在近几十年来得到了不断完善与发展。除去其非接触性、高精度、全场测量的同步性等优点, PIV 技术的特点更是超出了单点测速技术(如 LDV)的局限性, 能在同一瞬态记录下大量空间点上的速度分布信息<sup>[58]</sup>, 并可提供丰富的流场空间结构以及流动特性。除此之外 PIV 技术除向流场散布示踪粒子外, 所有测量装置并不介入流场, 故其对流场的干扰非常小。由于以上的优点, PIV 技术已成为现代流体测试中的一种重要手段, 获得了人们的普遍认可。

PIV 系统主要由可视化的示踪粒子、照明用的强光源(镭射光源)、高速 CCD 照相机、影像记录设备及图像处理系统等组成。

#### 2.3.2.2 PIV 测速原理

粒子图像测速 (PIV) 技术的基本原理是通过在流场中撒布示踪性与反光性良好, 且比重与流体相当的示踪粒子, 用自然光或脉冲激光片光 (light sheet) 照射所测流场切面区域, 通过 CCD 摄像设备摄取两次或多次曝光的粒子图像, 形成 PIV 底片, 记录相邻两帧图像序列之间的时间间隔, 再通过图像处理技术, 得到示踪粒子的瞬时速度, 从而确定流体的速度场<sup>[59]</sup>。

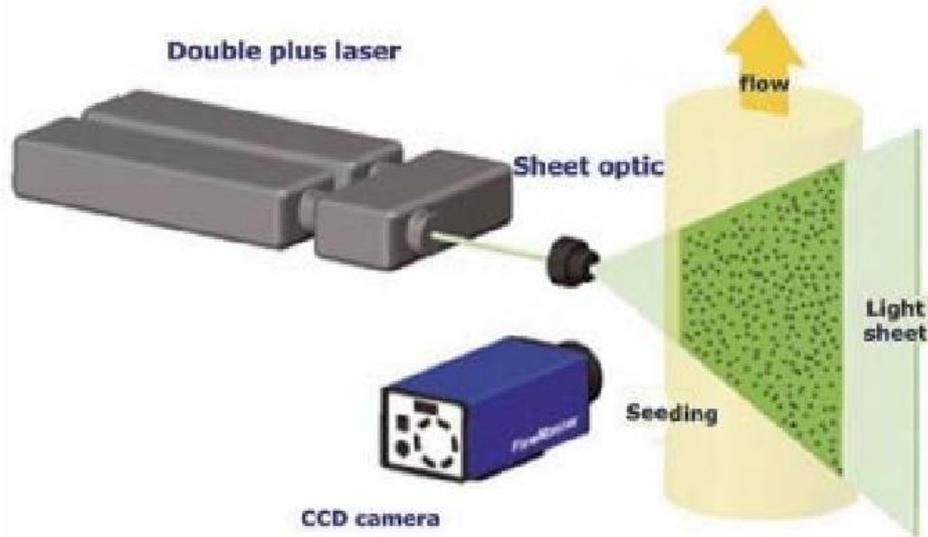


图 2-2 二维 PIV 系统 (<http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>)

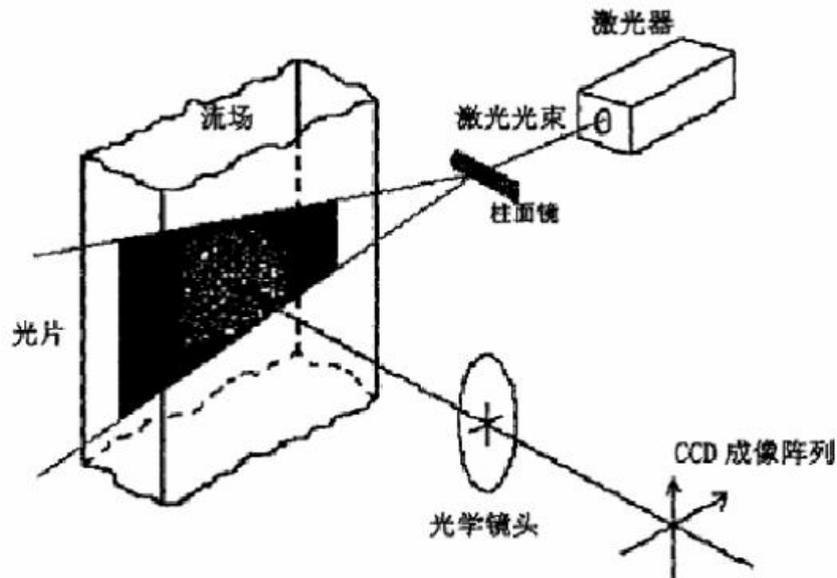


图 2-3 PIV 系统试验示意图<sup>[59]</sup>

## 2.4 本章小结

本章主要就本论文涉及的基本的流体力学理论、相关的研究方法进行了简要的介绍。

首先介绍了流体力学的基本理论，包括流动的基本形式、流体运动的控制方程和主要参数等。之后简明扼要地介绍了计算流体力学中的有限体积法、边界条件的类型、并着重对雷诺平均方法中的 SST  $k - \omega$  模型，以及大涡模拟的基本思路与 Smagorinsky-Lilly 模型进行了简要的阐述。最后对本论文实验设计中所采用的流体显示方法——PIV 流场测量进行了简要的阐述。

## 第三章 单柱绕流的数值模拟

钝体绕流是一个经典的流体力学问题，在自然领域与工程界非常常见，而其中的圆柱绕流问题更是由于其简单的拓扑结构有助于研究者理解认识绕流问题众多现象产生的机理，而一直受到研究者的广泛重视。尽管单圆柱绕流不管从实验研究以及相关的数值模拟都有许多的研究进行过，但单圆柱体绕流的研究，尤其是数值模拟，对于远流场并不关注，故鲜有研究涉及。故有必要在进入后续研究之前，对其进行一定系统性的比较研究。本章分布选用了 SST  $k-\omega$  模型以及大涡模拟的形式对单圆柱二维绕流问题进行了数值模拟的研究，同时又对单椭圆柱二维绕流采用大涡模拟方法。研究表明 SST  $k-\omega$  模型尽管对于圆柱受力，泄涡频率等问题在低雷诺的情况下有非常好的吻合，但是对于远流场问题由于湍流模型本身的问题并不适用。而对于主要针对三维水动力学问题的大涡模拟方法，其在低雷诺数情况下对于二维绕流问题也有一定适用性。

### 3.1 固定单圆柱绕流雷诺平均输运方法二维数值模拟

#### 3.1.1 模型建立

本章计算选择如下的流动条件：均匀定常来流的流速  $U_0 = 0.1003m/s$ ，圆柱直径  $D = 0.01m$ ，即  $Re = 1000$ 。具体拓扑模型如图 3-1 所示

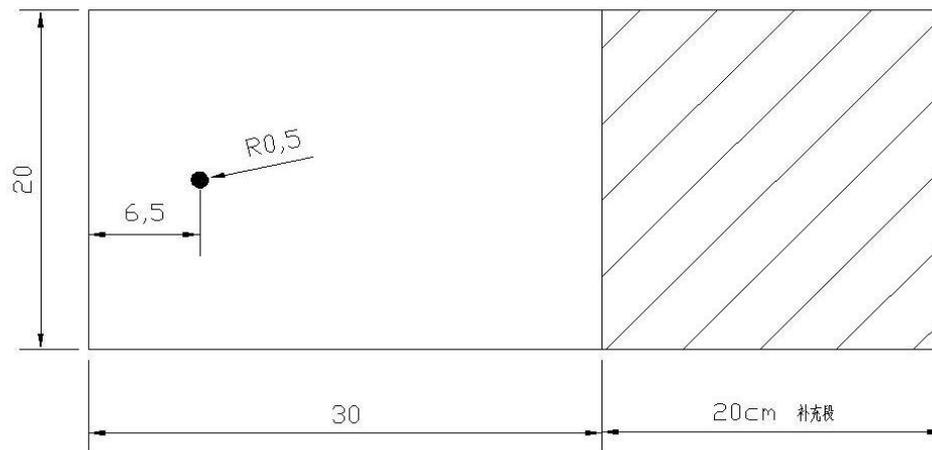


图 3-1 单圆柱绕流二维计算模型 (SST  $k-\omega$  模型)

计算域在笛卡尔坐标系下表示，选取圆柱截面中心为坐标原点，x 坐标轴方向与来流方向一致，y 方向平行于圆柱横截面。设置进流段长度  $L_1 = 6D$ ；去流段长度；  $L_2 = 23D/24D$ （流域长度  $L_1 + L_2 = 30D/50D$ ）流域宽度  $D_0 = 20D$ 。

#### 3.1.2 网格划分

圆柱周围流动较为复杂，需要比较密的网格，因此在网格划分时，需要将圆柱周围局部加密，借鉴 Liang & Papadakis 网格的划分方法，具体划分如图3-2与图3-3所示。

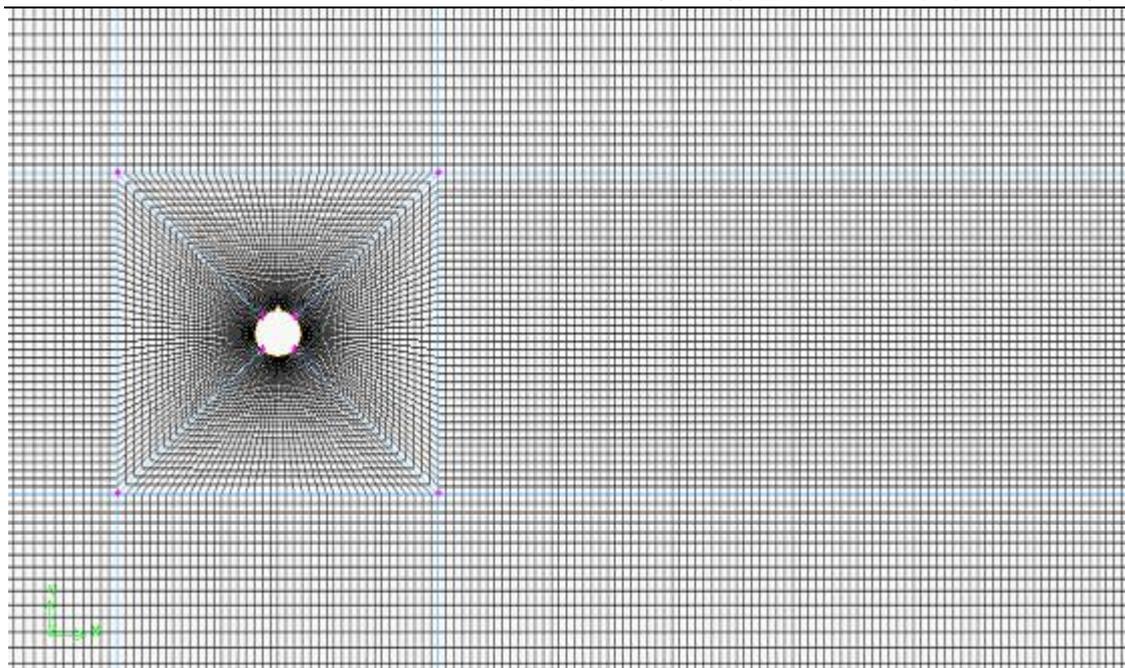


图 3-2 计算区域网格划分

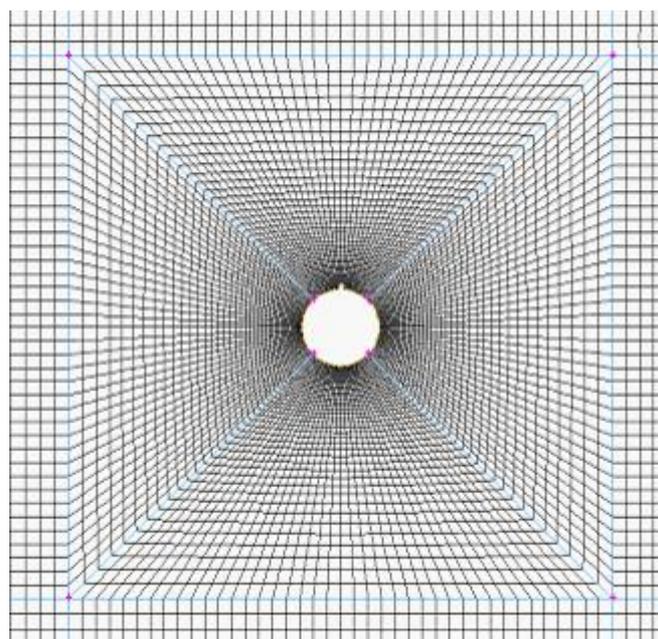


图 3-3 圆柱周围的网格

### 3.1.3 边界条件及初始条件

在计算之前需要对整个流场的边界条件进行设定，各个边界条件设置如下：

1. 入口：速度入口（velocity inlet），设定常流速  $U_0 = 0.1003\text{m/s}$ ；
2. 出口：出流边界（outflow）；
3. 上下面：对称边界（symmetry）；
4. 圆柱表面：墙面边界（wall）。

需要注意的是为了是计算更快捷，流体初速度设为入口流速  $U_0 = 0.1003\text{m/s}$ 。

### 3.1.4 计算工况选择

本章针对选定的流动工况，设置5组不同的计算条件，将从网格及去流段长度影响两个方面考查不同的模型对所需计算结果的影响。

表3-1 SST  $k - \omega$  模型数值计算工况

模型编号	圆柱尺寸 (mm)	流速 (m/s)	网格特征量	去流段	流域宽度
A1	10.0	0.1003	30	23D	20D
A2	10.0	0.1003	40	23D	20D
A3/B1	10.0	0.1003	50	23D	20D
A4	10.0	0.1003	60	23D	20D
B2	10.0	0.1003	50	43D	20D

上表中网格特征量指圆截面0.25弧长上分布的网格数，流域中所有的网格数量与分布变化皆以此为自变量。

表中 A 类工况用于考察计算网格质量，即检验网格收敛性。

表中 B 类工况用于考察去流段长度对圆柱尾流区尾涡捕捉质量的影响

### 3.1.5 模型比较

#### 3.1.5.1 网格的影响

网格疏密程度与计算迭代的收敛速度及最终的计算精度紧密相关。网格越密，精度越高，但计算量越大。由于今后要对圆柱的非定常绕流做大量计算，因此希望在保证计算结果一定精度的前提下，网格单元数尽量少。下面采用上述网格形式，保持其边界条件、初始条件、动量方程离散格式、计算流域等完全相同，测试不同疏密程度的网格系统对计算结果的影响，计算结果比较如下。

表3-2 A 工况结果汇总

模型编号	网格特征量	St	$C_d$	$C_{L_0}$	$C_{L_{max}}$
A1	40	0.2264	1.44	0	1.154
A2	50	0.2202	1.413	0	1.132
A3	60	0.2167	1.414	0	1.069
A4	70	0.2156	1.415	0	1.042

由图3-4，可得到网格特征量对于阻力系数 $C_d$ 的关系。除 A1的阻力系数较其他三中明显较大外，A2-A4三套网格的阻力系数 $C_d$ 相差不大，即从阻力系数的角度来说，A2网格即已经收敛。

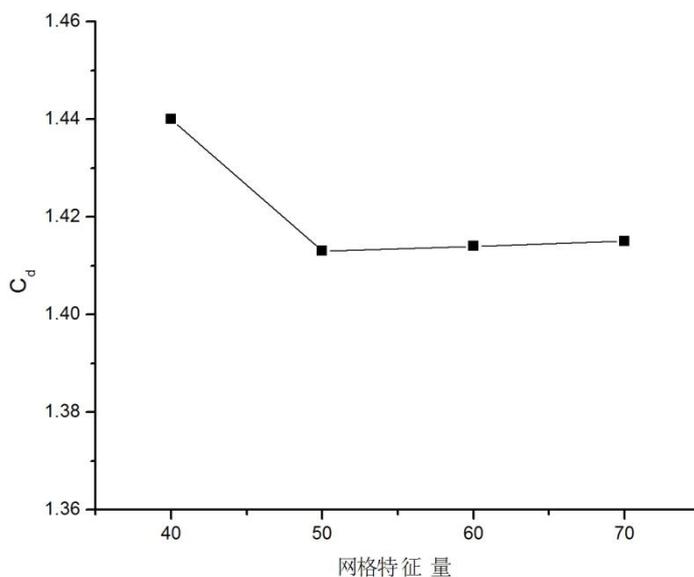


图3-4 网格对应于阻力系数 $C_D$ 图

由图3-5, 可得到网格特征量对于脉动升力系数 $C_{l_{max}}$ 的关系。随着网格越来越密,  $C_{l_{max}}$ 的幅值越来越小, 但其变化的幅度来看, 随着网格数的增加, 两者变化差异也越来越小, 发现 A3与 A4两套网格的脉动升力系数 $C_{l_{max}}$ 相差不大, 即从脉动升力系数 $C_{l_{max}}$ 的角度来说, A3网格可认为收敛。

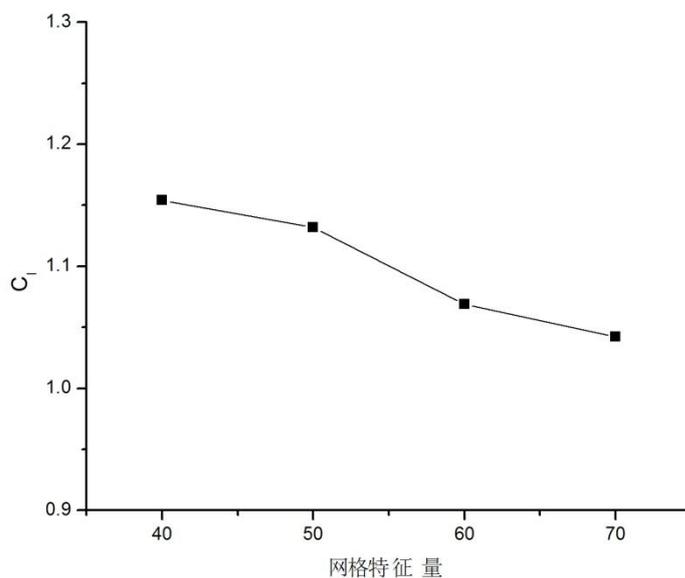


图3-5 网格对应于阻力系数 $C_{l_{max}}$ 图

由图3-6, 可得到网格特征量对于斯特劳哈尔数 $St$ 的关系。随着网格的增加, 斯特劳哈尔数 $St$ 逐渐减小, 同时当 A3工况是开始稳定, 且 A3也落于实验值范围之内 (大约介于 0.2~0.22 之间), 即从斯特劳哈尔数 $St$ 的角度来说, A3网格可认为是可行的。

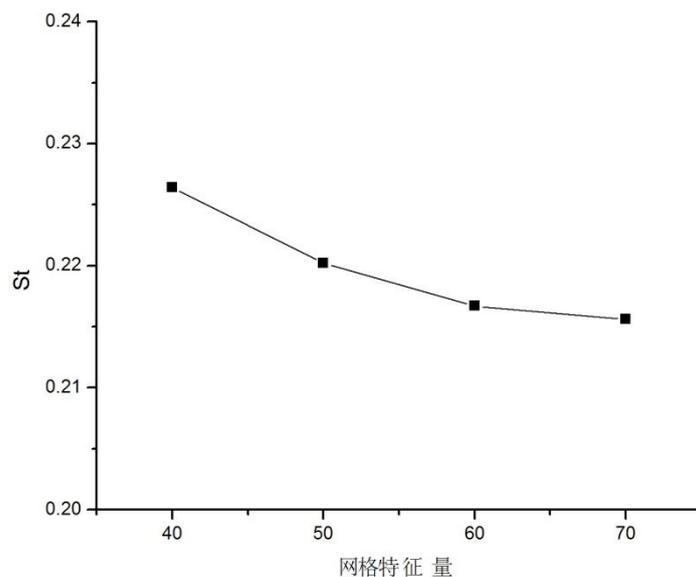


图 3-6 网格对应于斯特劳哈尔数 St 图

综合来看可得，A3工况的网格数已经相对达到要求精度。

下面分别给出四个工况升阻力时历曲线图（图3-7至图3-10），涡量分布图（图3-11至图3-14），以及流场压力分布图（图3-15至图3-18）。

1. 单圆柱涡量图比较

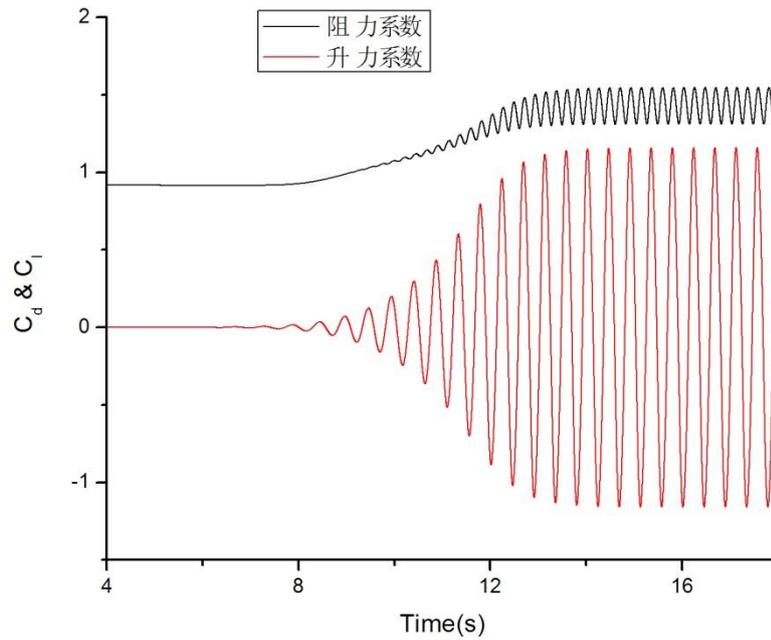


图3-7 A1工况单圆柱升阻力时历图

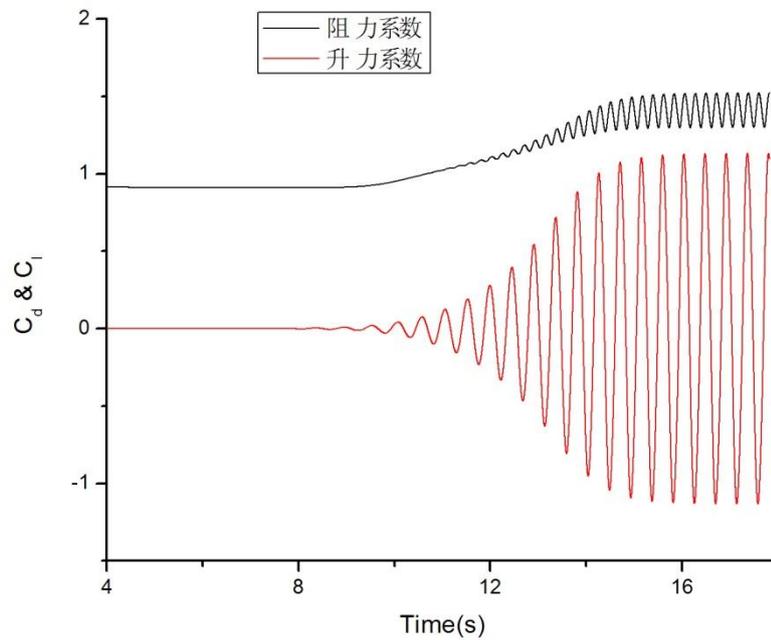


图3-8 A2工况单圆柱升阻力时历图

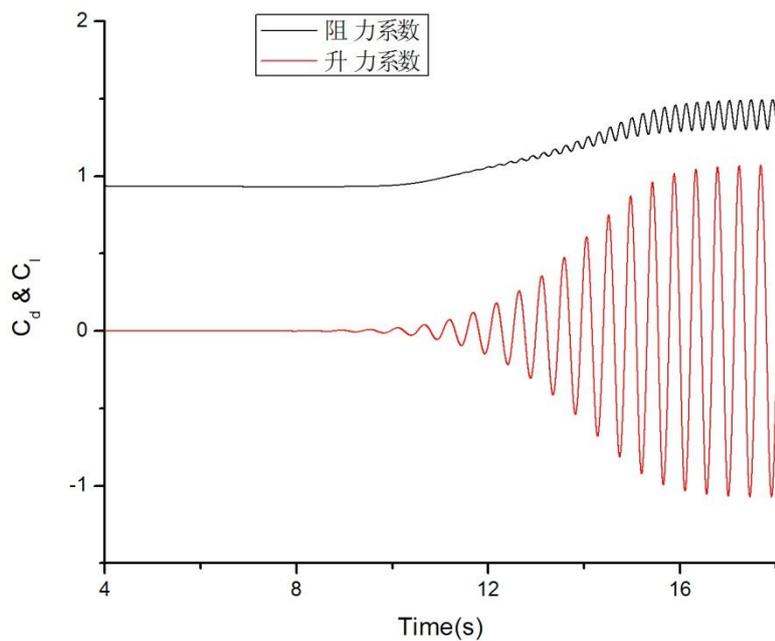


图3-9 A3工况单圆柱升阻力时历图

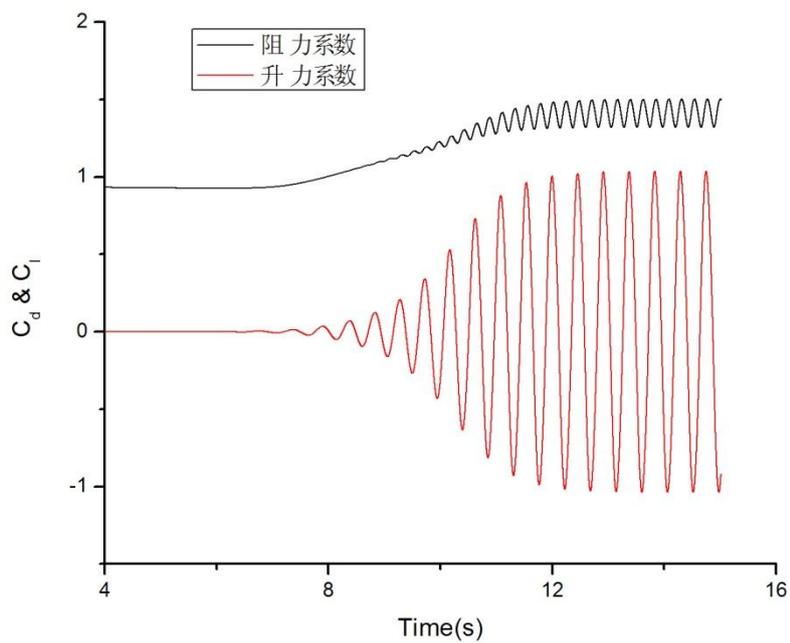


图3-10 A4工况单圆柱升阻力时历图

2. 单圆柱涡量图比较

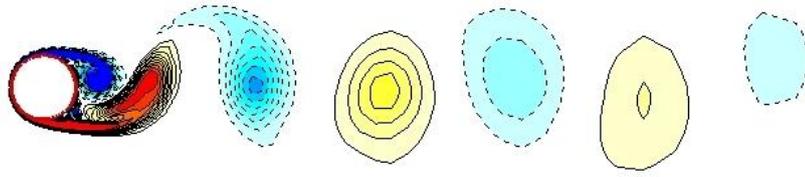


图3-11 A1工况单圆柱涡量图

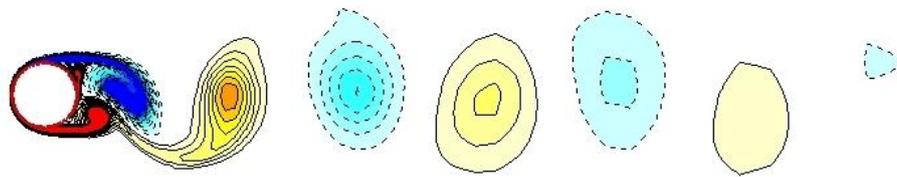


图3-12 A2工况单圆柱涡量图

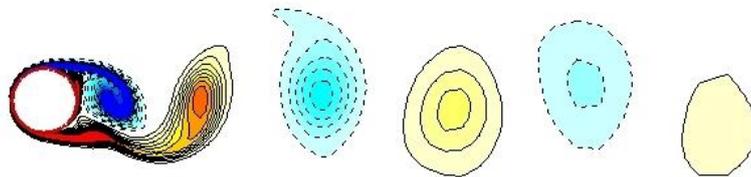


图3-13 A3工况单圆柱涡量图

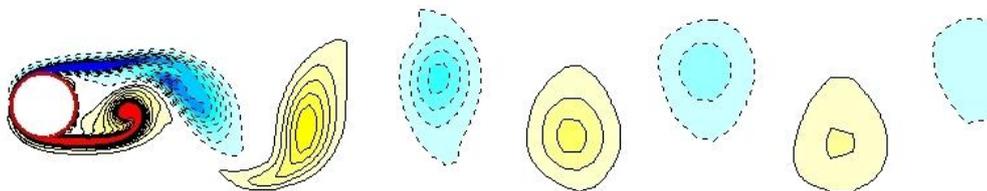


图3-14 A4工况单圆柱涡量图

3. 单圆柱流场压力分布图比较

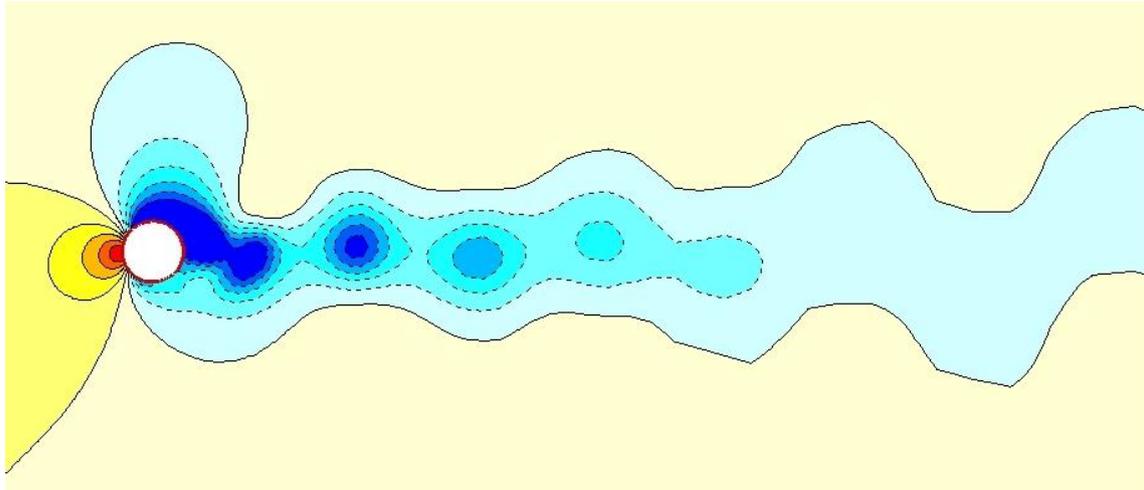


图3-15 A1工况单圆柱流场压力分布图

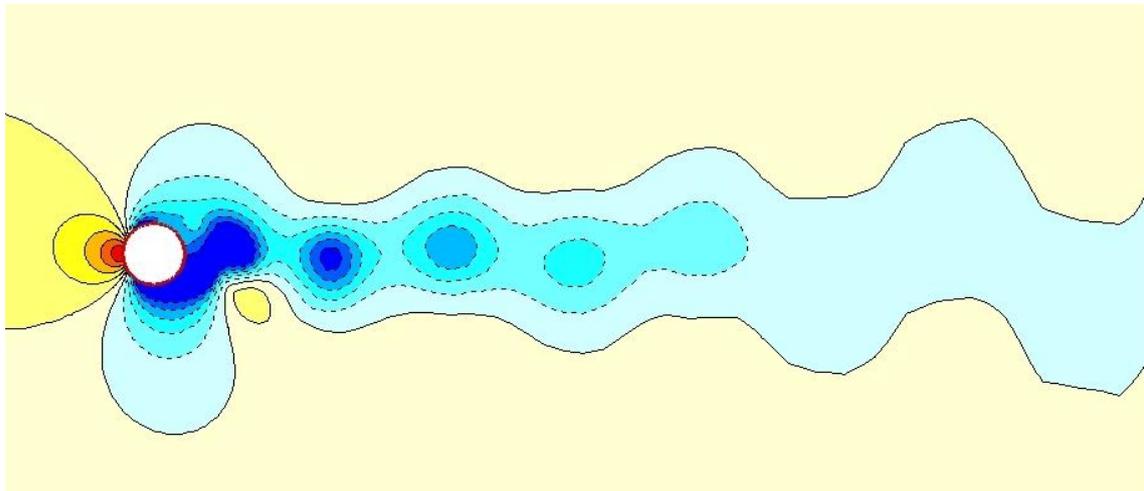


图3-16 A2工况单圆柱流场压力分布图

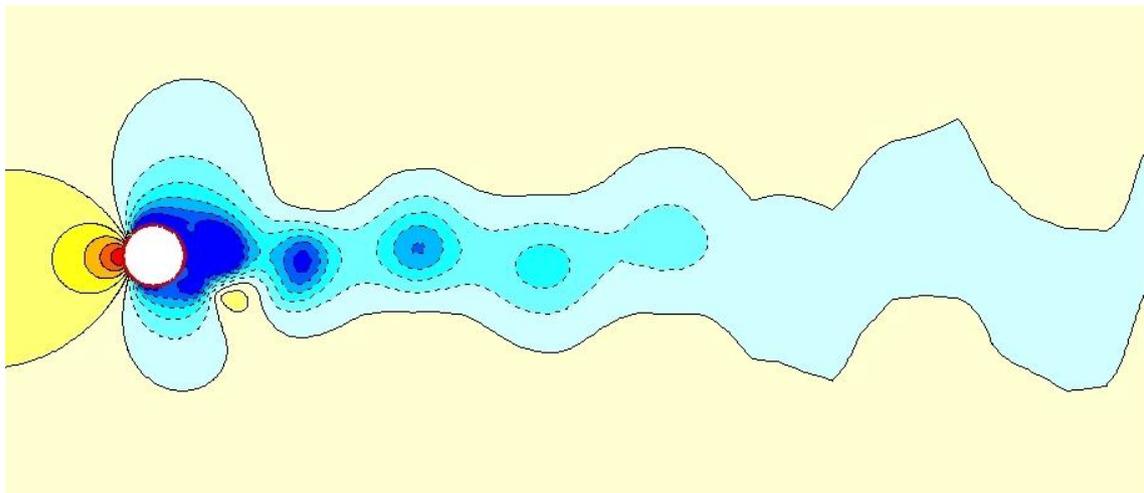


图3-17 A3工况单圆柱流场压力分布图

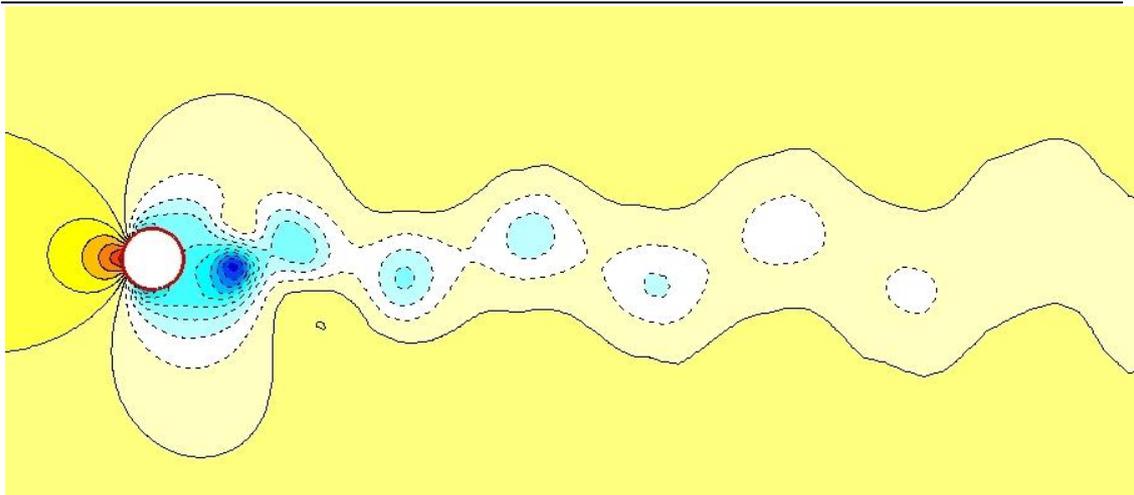


图3-18 A4工况单圆柱流场压力分布图

从涡量分布图以及流场压力分布图可以发现，在近流场区域泄涡捕捉现象较明显，但远流场处泄涡现象捕捉非常困难，推断可能由于以下两个原因造成：

1. 去流段网格较稀疏，由于计算误差导致泄涡捕捉困难；
2. 去流段较短，由于流场出口的存在影响了泄涡的捕捉质量。

故对此进行以下新的工况设计，加长去流段，同时保持离开圆柱一段距离网格的稠密度，测试在使用  $SST k - \omega$  模型的情况下，去流段长度与网格疏密程度与远流场涡街现象捕捉之间的关系。

### 3.1.5.2 去流段的影响

如上一节所述，本节为了更好地开展后续计算工作，有必要对去流段条件远流场尾涡捕捉的效果进行分析。现选用 A 类工况计算结果中测试所得的网格特征量50为基础，将去流段由原来的23D 拓展为43D，并对去流段适当加密，其他网格条件等保持不变。可得如下计算结果，见下图3-19。

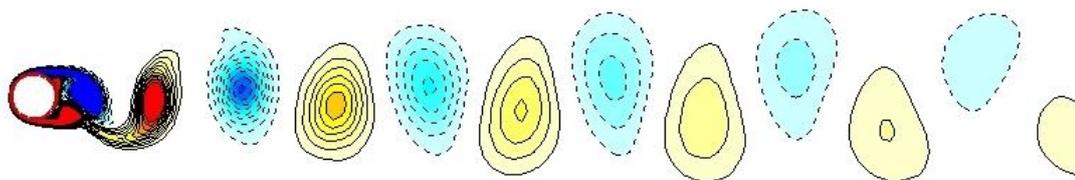


图3-19 B2工况单圆柱涡量图

比较 A3/B1工况可发现，B2工况尽管对于远流场尾涡捕捉效果有所提升，但对于稍远流场（5D 范围外）流场漩涡捕捉的结果，从定性上分析不甚理想。究其原因可能如下：

1. 网格的疏密程度对于 RANS 方法，相较于大涡模拟方法，远远稀疏，故对于捕捉远流场漩涡的效果并不理想；

2. SST  $k - \omega$  湍流模型在设计初期所面向的问题即不关注远流场漩涡。尤其可以发现对于远场来说 SST  $k - \omega$  湍流模型所计算而得的有效湍流粘性远大于近场所得数值，数量级可相差至 $10^9$  级别，见下图3-20。

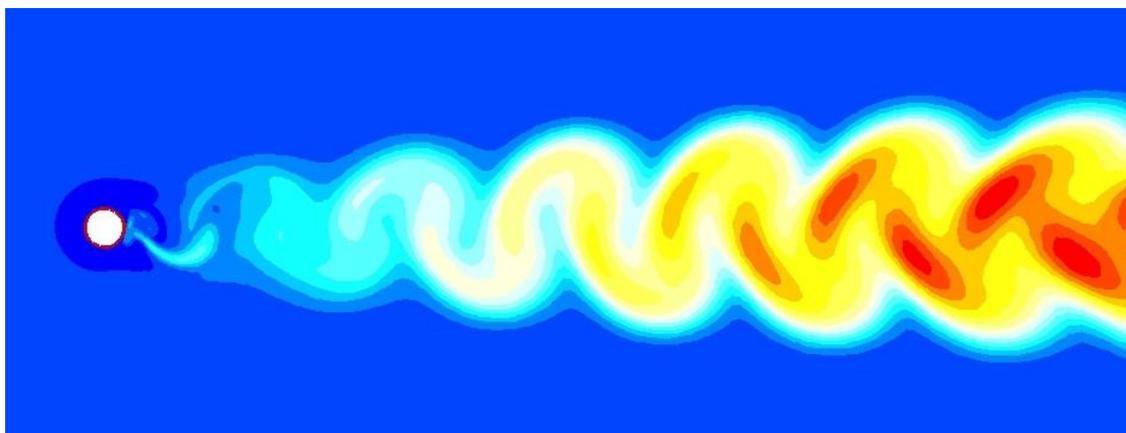


图3-20 B2单圆柱流场有效湍流粘性系数

故可得出结论，SST  $k - \omega$  湍流模型并不适合计算远流场漩涡捕捉问题。

### 3.2 固定单柱绕流大涡模拟方法二维数值模拟

#### 3.2.1 模型特点

本节中固定圆柱大涡模拟的模型区域，边界条件，网格划分等基本都与上一小节中特点SST  $k - \omega$  湍流模型的基本保持一致，故在此不再叙述。

本节中固定椭圆柱大涡模拟的模型区域，网格划分与圆柱模型在近椭圆柱附近处有一定的差别，故在此进行一定的叙述，而边界条件等基本都与上一小节中特点SST  $k - \omega$  湍流模型的基本保持一致，故在此不再叙述。

为确保在椭圆柱网格划分是亦使用结构话网格，并保证网格质量，在近椭圆柱附近区域划分如图3-21所示，之后可的网格如图3-22所示。

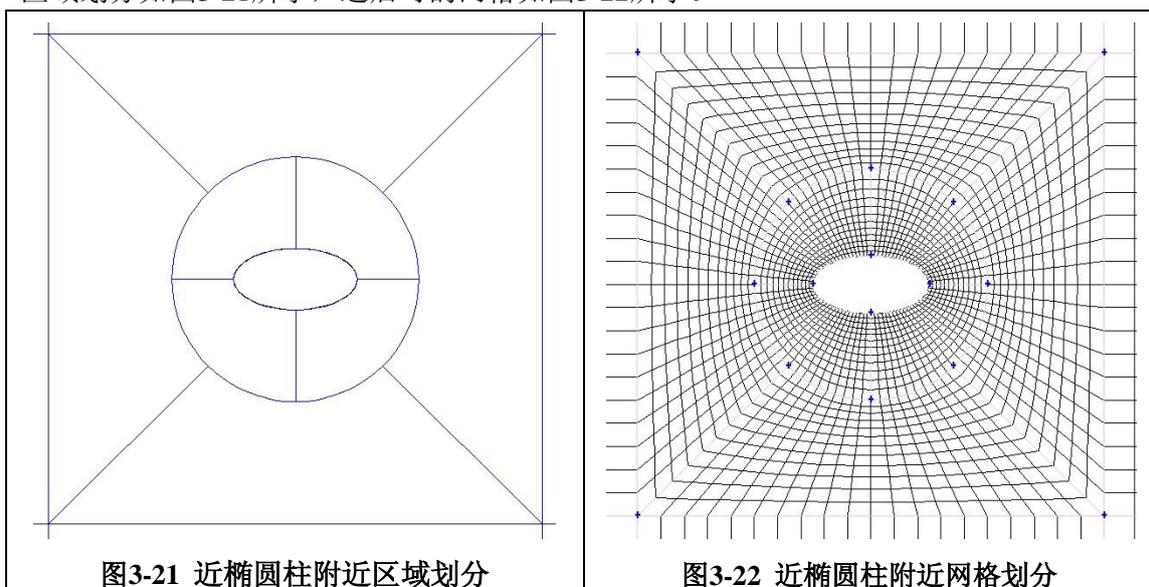


图3-21 近椭圆柱附近区域划分

图3-22 近椭圆柱附近网格划分

#### 3.2.2 单圆柱水动力分析

此节主要对固定单圆柱绕流尾部流程形式做一个细致分析，而对于圆柱受力等仅简要列出，如下：

数值计算可得在雷诺数  $Re = 500$  时, 单圆柱的  $St$  数为 0.226; 平均阻力系数  $C_{d0} = 1.466$ , 与二阶泄涡频率一致的脉动阻力系数  $C_{d2} = 0.140$ ; 平均升力系数  $C_{l0} = 0$ , 与一阶泄涡频率一致的脉动升力系数  $C_{l1} = 1.205$ ; 平均扭矩系数  $C_{m0} = 0$ , 与一阶泄涡频率一致的脉动扭矩系数  $C_{m1} = 0.00467$ 。

### 3.2.2.1 圆柱周围的时均流场

图3-23 为圆柱正后方后方（沿圆柱中心线）的  $X$  方向无因此时均速度纵向分布图。从图中我们可以明显看出在如下规律：

1. 在此雷诺数下, 当流体进过圆柱时圆柱在其尾部距离圆柱中心  $0.5D$  至  $1D$  范围内形成时均速度为负（与来流方向相反）的回流区域；
2. 经过这个回流区域之后, 速度迅速增大, 并逐渐平衡至入口来流速度。

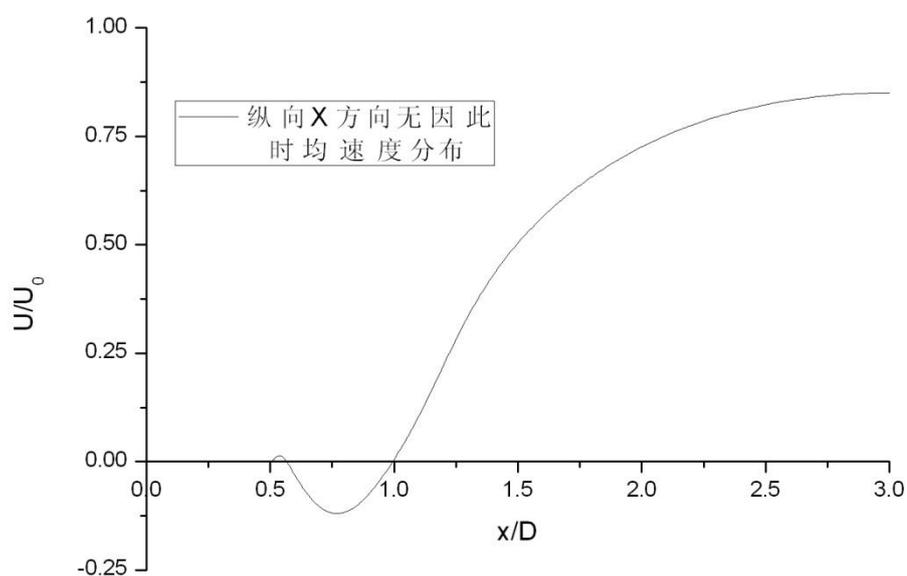


图3-23 圆柱纵向  $X$  方向无因此时均速度分布（沿圆柱中心线）

图 3-24 为圆柱尾流区横向 X 方向无因此时均速度纵向分布图，共选取了 8 个典型截面。

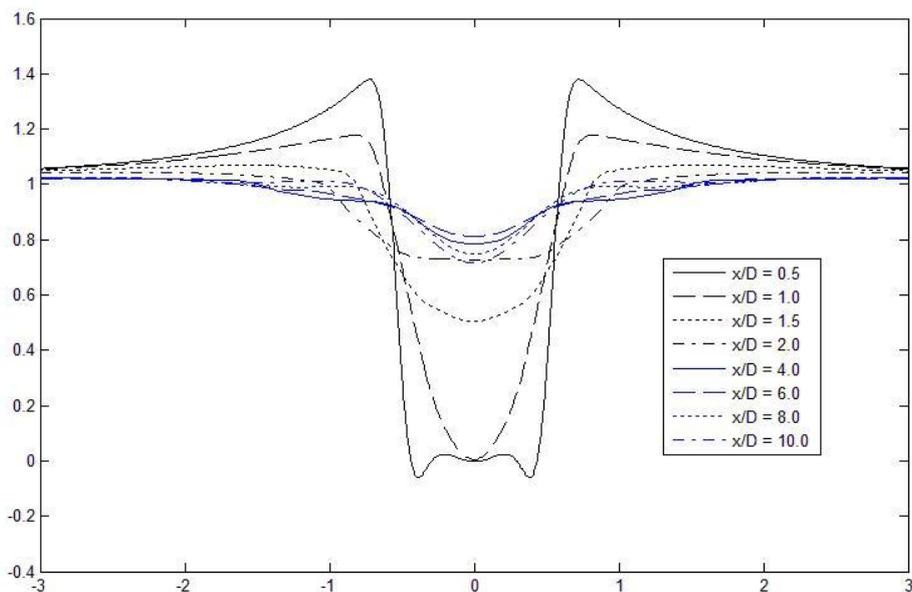


图 3-24 圆柱横向 X 方向无因此时均速度分布

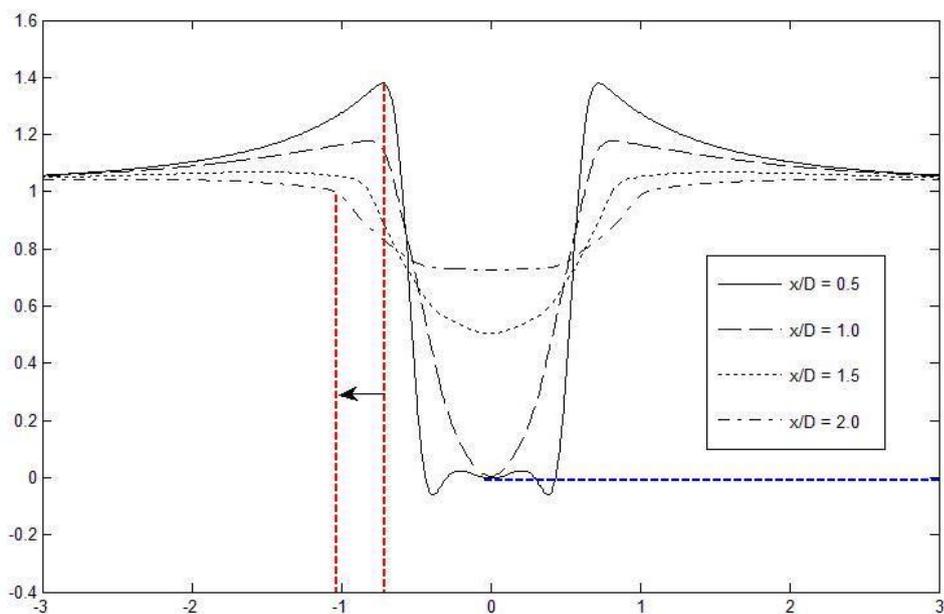


图 3-25 圆柱横向 X 方向无因此时均速度分布（近圆柱尾流区）

图3-25为圆柱尾流区横向 X 方向无因此时均速度纵向分布图（近圆柱尾流区），共选取了4个典型截面。从图中我们可以得到流场如下特点：

1.  $x/D = 0.5$ 时，蓝色点划线标出的中心点处时均 X 向速度为  $0\text{m/s}$ ，但是左右两侧有对称小于  $0\text{m/s}$  的时均速度区，同时发现，在向两侧移动的过程中，速度迅速上升达到极大值，且超过入口来流速度，达到  $1.4U_0$ ，此处实则对应于流体绕过圆柱时流场剪切层。
2. 随着远离圆柱，流场继续发展，时均流速曲线也相应开始变得相对平坦。

- a) 最小值从图中可以看出迅速增大，如在  $x/D = 1.5$  时，速度已达到  $0.5U_0$ 。
- b) 红线两条点划线间标出了  $x/D = 0.5$  与  $x/D = 2.0$ ，时均流速最大值的变化趋势，可以看到，其流场时均流速的最大值的横向位置在随着远离圆柱区而向外移动，同时其幅值也相应减少。至  $x/D = 2.0$  时，红线标出处已不在是一个峰值，而变成了均匀过度。

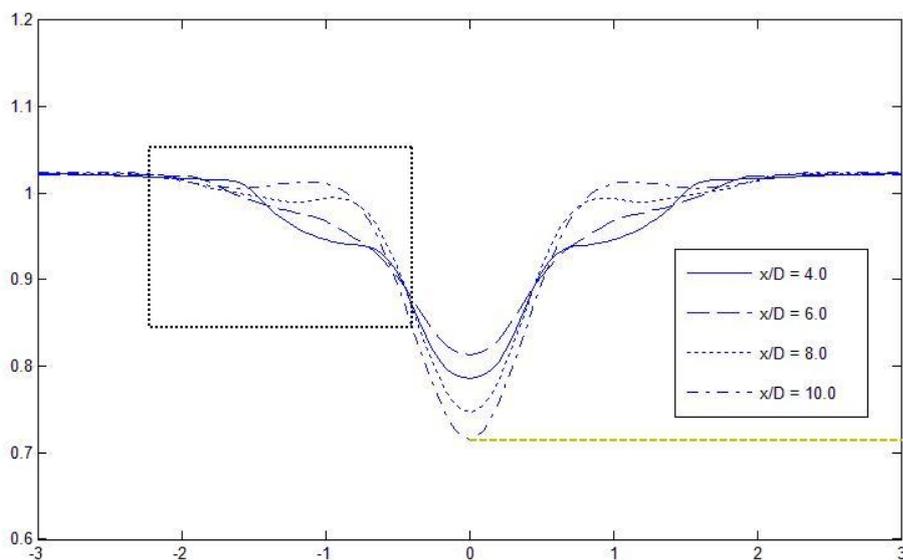


图 3-26 圆柱横向 X 方向无因此时均速度分布（近圆柱尾流区）

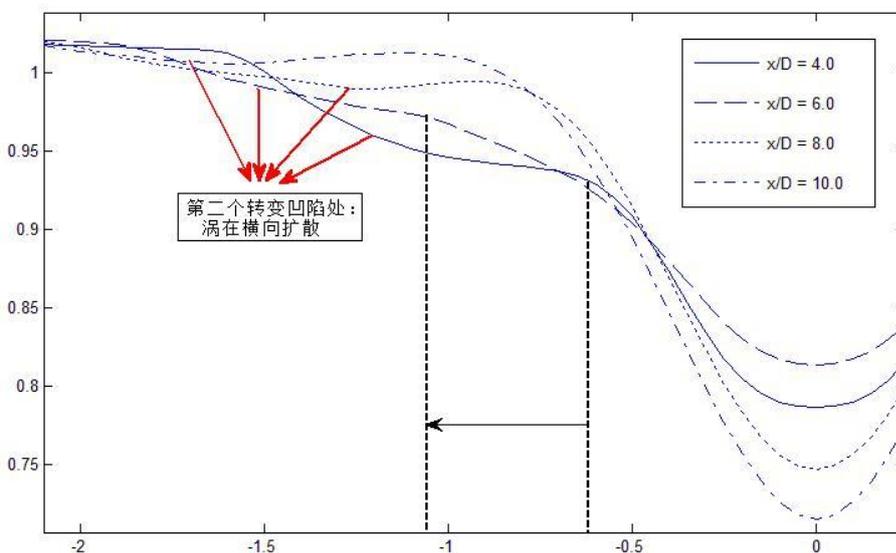


图 3-27 圆柱横向 X 方向无因此时均速度分布——涡横向扩散现象

图3-26为圆柱尾流区横向 X 方向无因此时均速度纵向分布图（远圆柱尾流区），共选取了4个典型截面。从图中我们可以得出流场如下特点：

1. 方向时均速度最小值依旧随着远离圆柱在变大，但趋势变缓慢。
2. X 方向时均速度曲线出现波动情况，如  $x/D = 4.0$  的曲线，出现了一个区段“反常”的时均速度小于其他曲线值。在放大了这个区域（黑色点划线框）后，见图3-27，我

们可以发现这些“转捩点”——第二个凹陷区（红色箭头标出处），随着远离圆柱也在向外移动，我们可以推测，这是由于此时均曲线的绘制是选取了一个典型泄涡周期的变化平均而得的，这个外移的“转捩点”代表了漩涡随着远离圆柱的距离的增大，漩涡在不断发生了横向扩散，即涡心横坐标越来越远离中心线，故出现了如上波动。

### 3.2.2.2 圆柱周围的瞬时流场

为了更好地认识圆柱绕流的泄涡过程，此处选用两种方式，即涡量图的形式与流线追踪的形式来研究这一个非定常的过程。图3-28至图3-35为涡量图的形式表现了圆柱绕流在一个周期内的涡脱落的过程，其中虚线部分表达的是负涡量，实线部分表达的是正涡量。

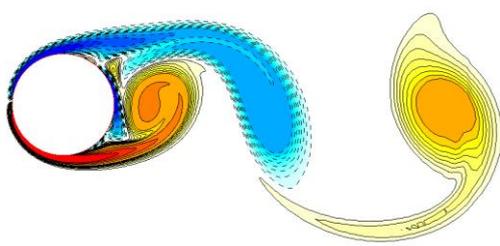


图3-28 一周期圆柱泄涡涡量图（6.1668s）

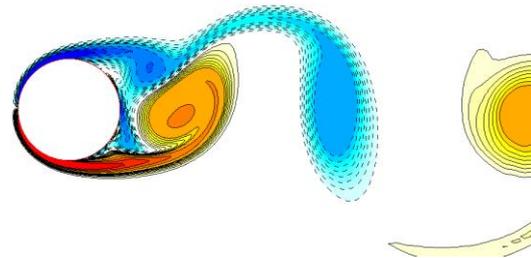


图3-29 一周期圆柱泄涡涡量图（6.21s）

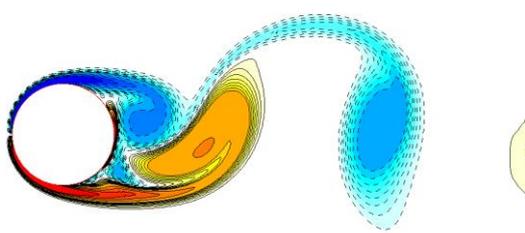


图3-30 一周期圆柱泄涡涡量图（6.24024s）

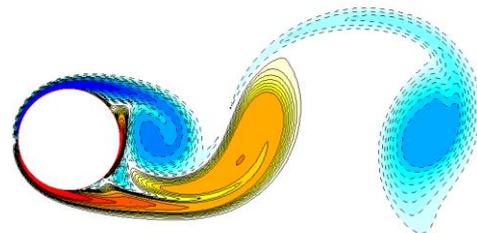


图3-31 一周期圆柱泄涡涡量图（6.264s）

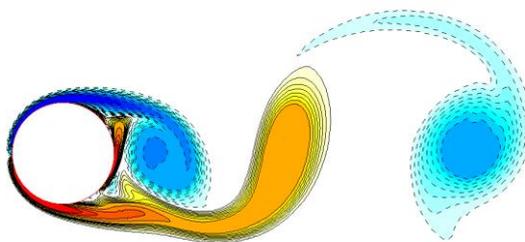


图3-32 一周期圆柱泄涡涡量图（6.28992s）

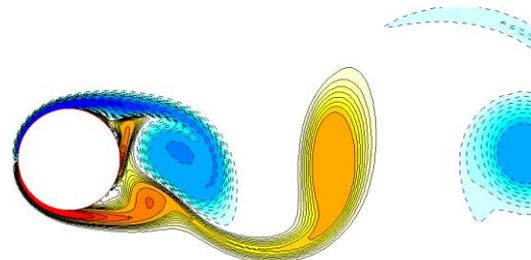


图3-33 一周期圆柱泄涡涡量图（6.318s）

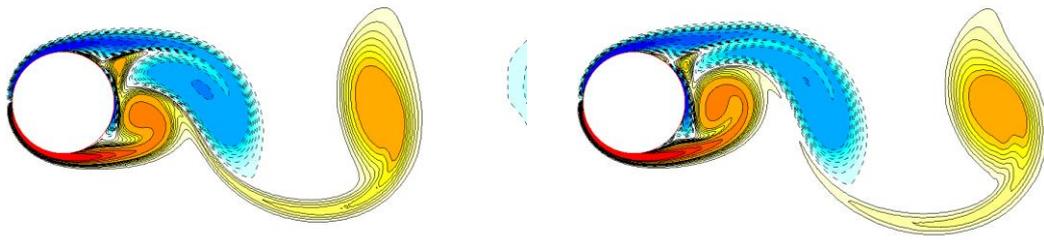


图3-34 一周期圆柱泄涡涡量图 (6.34824s)    图3-35 一周期圆柱泄涡涡量图 (6.37416s)

上面八张图片显示了流体经过圆柱,发生泄涡现象的完整一个周期内不同时刻圆柱周围的涡量分布图,从图中可以看出如下规律:

1. 在靠近圆柱尾部表面处由两侧剪切层包裹的区域内,存在着一对一直相互竞争的正反涡量对,此正反涡量对,我们发现永不脱离圆柱尾部表面,同时正反涡量对的横向相对位置与剪切层内生成并脱离的正反涡量漩涡的相对横向位置互为相反。且此正反涡量对的交接点,即必存在的一个零涡量点随着时间的推移或者说外部泄涡的过程变化沿着圆柱尾部表面发生移动。我们可以发现在如图3-36所示的时间点,此时负涡量漩涡已成长的非常成熟并准备脱落,而正涡量漩涡亦在一侧形成并开始逐渐移至中心线处,此时,下一个负涡量漩涡的“萌芽”正在另一侧剪切层内准备形成,而观察上文提及的接近圆柱尾部表面的正反涡量对,可以发现,此时涡量对中负涡量占主导,并把正涡量推向了一侧剪切层,即此时零涡量点移至圆柱尾部表面一侧,在下一个时间点,如图3-37所示,我们可以看到在已经生成并逐渐脱离的正涡量漩涡,靠近圆柱尾部表面的正负涡量对的共同作用下,剪切层内形成下一个负涡量漩涡的“萌芽”,并在之后的时间内开始被脱落的正涡量漩涡诱导牵引,移动至圆柱中心线处并远离圆柱,同时此新生成的负涡量漩涡亦推挤圆柱尾部表面的正反涡量对向另一侧移动,圆柱另一侧开始由此生成正涡量“萌芽”,由此往复。

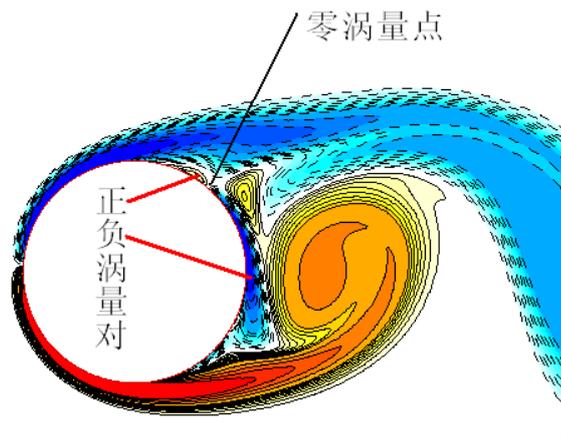


图3-36 圆柱泄涡 (6.16680s) 放大图

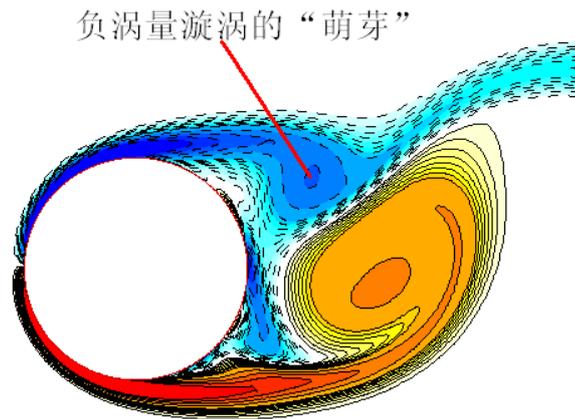


图3-37 圆柱泄涡 (6.21s) 放大图

- 从宏观上来说，圆柱泄涡过程即为，漩涡首先在圆柱尾部一侧剪切区内形成，随着时间的推移，漩涡会逐渐向圆柱尾部中心线处靠近，同时远离圆柱，直至最终脱落，随后在圆柱尾部与中心线对称的另一侧剪切区内形成另一个相反涡量的漩涡，同样这个漩涡也重复着上述的过程，即逐渐向圆柱中心线处靠近并远离圆柱，直至脱落。由此反复，便在圆柱尾流区中形成稳定卡门涡街现象。

同时我们此处使用新的流线表达方式来追寻某个时刻各水质点的运动趋势，从另一个角度地对流体经过圆柱，发生泄涡现象的过程加以阐述，使得近圆柱处的某些现象的物理过程，如漩涡“萌芽”在圆柱表面的生长过程以及其形态等，得以更清晰地表现。如图3-38至图3-45所示。

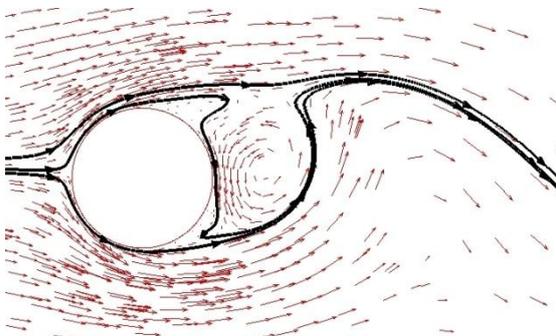


图3-38 一周期圆柱泄涡流线图 (6.16680s)

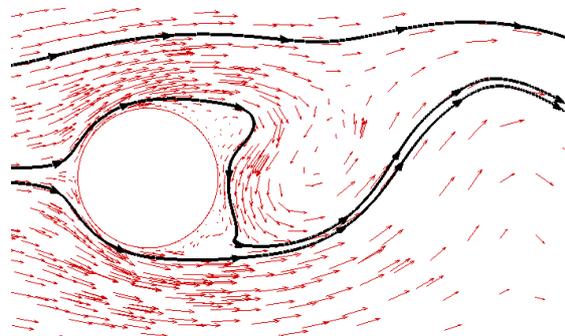


图3-39 一周期圆柱泄涡流线图 (6.21s)

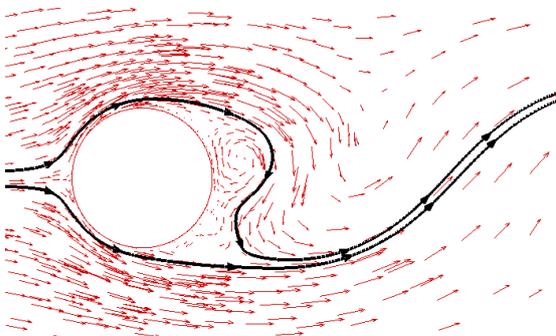


图3-40 一周期圆柱泄涡流线图 (6.24024s)

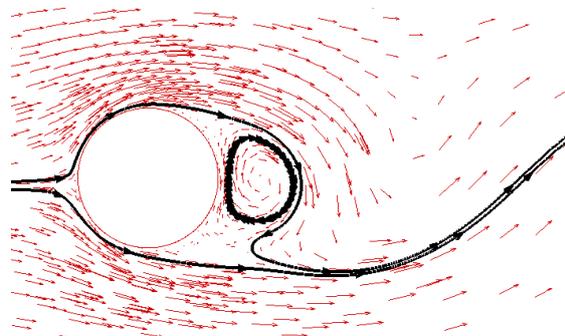


图3-41 一周期圆柱泄涡流线图 (6.264s)

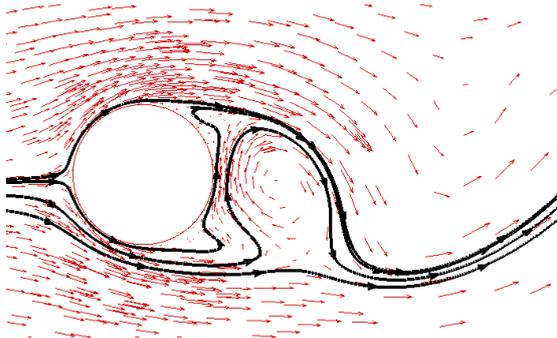


图3-42 一周期圆柱泄涡流线图 (6.28992s)

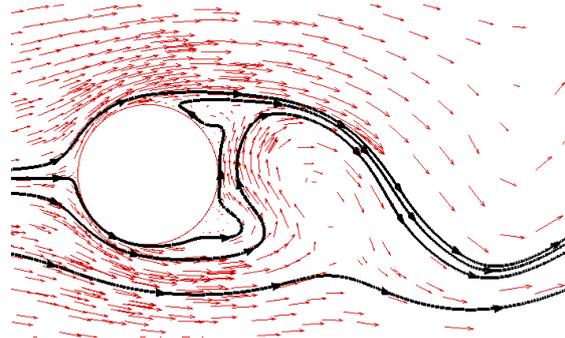


图3-43 一周期圆柱泄涡流线图 (6.318s)

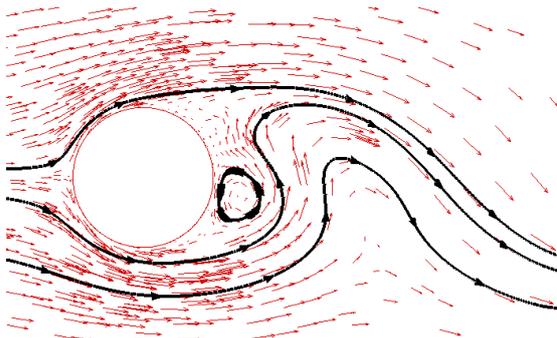


图3-44 一周期圆柱泄涡流线图 (6.34824s)

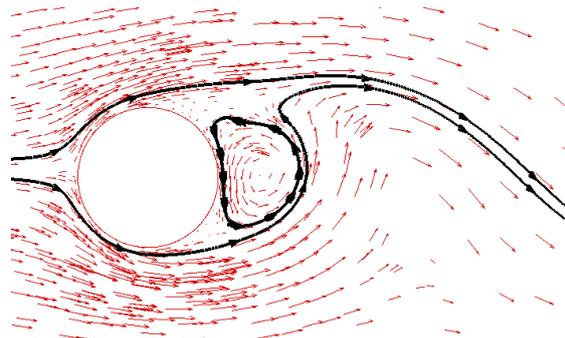


图3-45 一周期圆柱泄涡流线图 (6.37416s)

从上图，我们能非常清晰地观察到涡在剪切层内部的“萌芽”，逐渐生长，向圆柱中心线移动并远离圆柱尾部的过程。图3-38中，可以看到上方剪切层中，负涡量漩涡瘦长的“萌芽”已经产生，而正涡量漩涡还没有脱离圆柱范围；图3-39中，负涡量漩涡的“萌芽”不断生长，而正涡量漩涡开始逐渐远离圆柱；至图3-41，负涡量漩涡已成熟地形成，并移至圆柱中心线处，准备脱离圆柱范围；图3-42中，我们能观测到另一侧的正涡量漩涡的“萌芽”开始产生的现象。至图3-45，又一个正涡量漩涡已成熟地形成，并移至圆柱中心线处，准备脱离圆柱范围；

### 3.2.3 单椭圆柱水动力分析

此节主要对固定单椭圆柱绕流尾部流程形式做一个细致分析，而对于椭圆柱受力等仅简要列出，如下。

数值计算可得在雷诺数  $Re = 250$  时，单椭圆柱的  $St$  数为 0.202；平均阻力系数  $C_{d0} = 0.891$ ，与二阶泄涡频率一致的脉动阻力系数  $C_{d2} = 0.00497$ ；平均升力系数  $C_{l0} = 0$ ，与一阶泄涡频率一致的脉动升力系数  $C_{l1} = 0.254$ ；平均扭矩系数  $C_{m0} = 0$ ，与一阶泄涡频率一致的脉动扭矩系数  $C_{m1} = 0.00239$ 。

#### 3.2.3.1 椭圆柱周围的时均流场

图3-46 为椭圆柱正后方后方(沿椭圆柱中心线)的 X 方向无因此时均速度纵向分布图。从图中我们可以明显看出在如下规律：

1. 在此雷诺数 ( $Re = 250$ ) 下，当流体进过椭圆圆柱时椭圆柱在其尾部距离圆柱中心  $0.5D$  至  $1.3D$  范围内 ( $D$  此处为椭圆长轴长度，与上一小节中圆柱直径一致) 形成时均速度为负 (与来流方向相反) 的回流区域，此回流区域较之圆柱更长，更深，即小于零的回流速度的绝对值较之圆柱来的更大。
2. 经过这个回流区域之后，速度迅速增大，并逐渐平衡至入口来流速度。

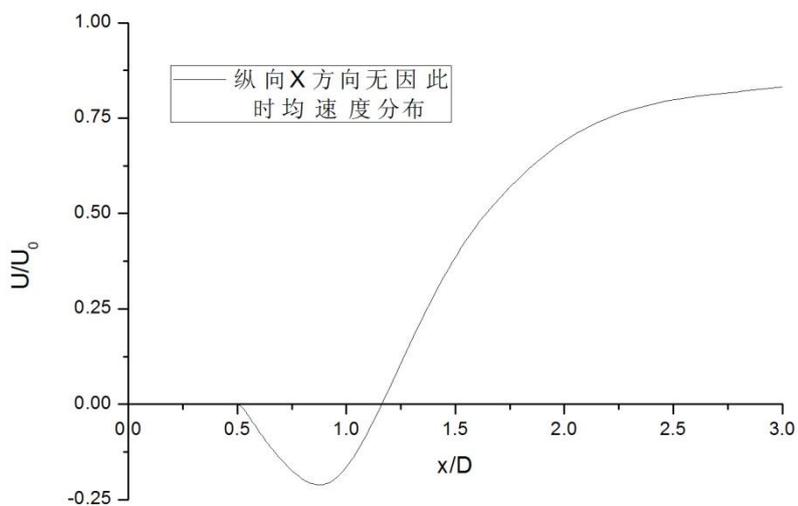


图3-46 椭圆柱纵向 X 方向无因次时均速度分布（沿椭圆柱中心线）

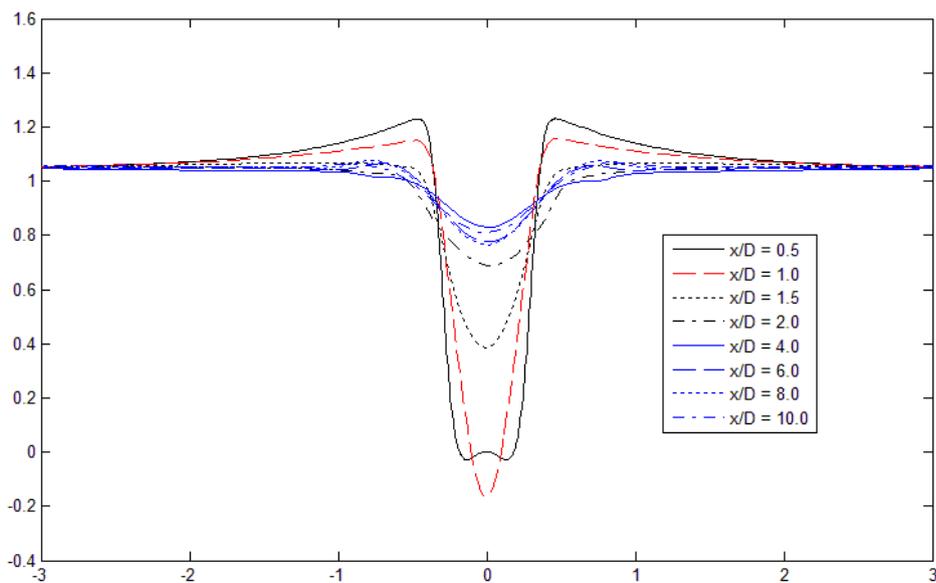


图3-47 椭圆柱横向 X 方向无因次时均速度分布

图3-47为椭圆柱尾流区横向 X 方向无因次时均速度纵向分布图，与上一小节中圆柱一致，共选取了8个典型截面。

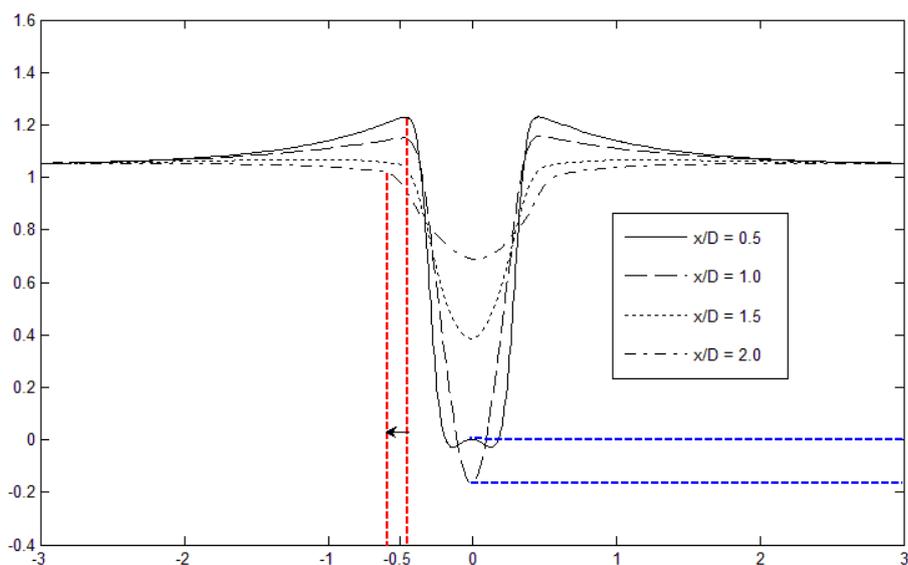


图3-48 椭圆柱横向 X 方向无因此时均速度分布（近椭圆柱尾流区）

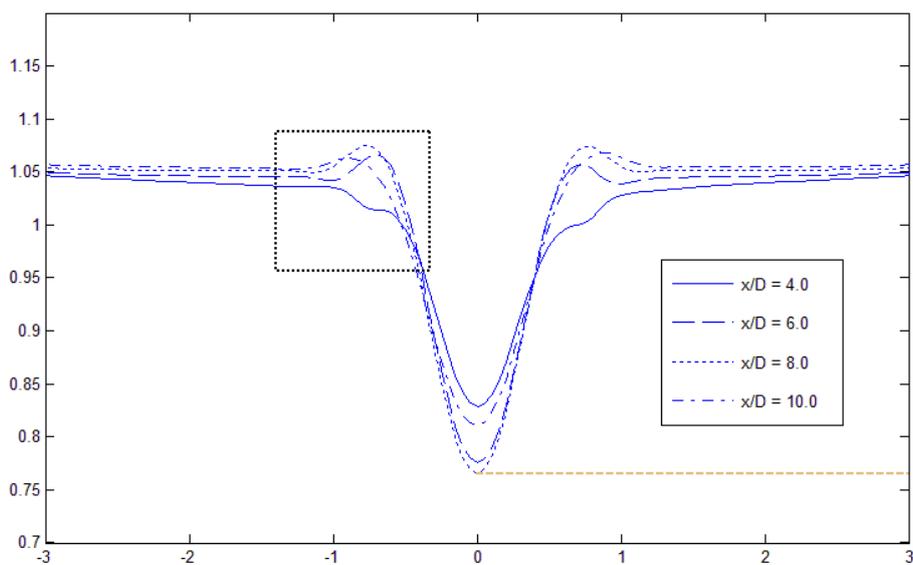


图3-49 椭圆柱横向 X 方向无因此时均速度分布（远椭圆柱尾流区）

图3-48为椭圆柱尾流区横向 X 方向无因此时均速度纵向分布图（近椭圆柱尾流区），与上一小节中圆柱一致，共选取了4个典型截面。从图中我们可以得到流场如下特点：

1. 在  $x/D = 0.5$  时，蓝色点划线标出的中心点处时均 X 向速度为  $0\text{m/s}$ ，但是左右两侧有对称小于  $0\text{m/s}$  的时均速度区，与圆柱不同的是，在向两侧移动的过程中，X 方向无因此时均速度迅速上升达到极大值，且超过入口来流速度，达到  $1.2U_0$ ，此处实则对应于流体绕过椭圆柱时流场剪切层，这相较于圆柱的  $1.4U_0$  来的小。
2. 随着远离椭圆柱，流场继续发展，时均流速曲线总的趋势也相应开始变得相对平坦。与圆柱大致趋势保持一致。

- a) 但是在  $x/D = 1.0$  时, 横向 X 方向无因此时均速度分布曲线上出现了一个小于零的极小值, 这是由于相较于上一节的圆柱绕流来说, 此节中的椭圆柱回流长度在其尾部距离圆柱中心  $0.5D$  至  $1.3D$  范围内, 即在  $x/D = 1.0$ , 依旧处于椭圆柱尾流回流区内。
- b) 最小值从图中可以看出迅速增大, 如在  $x/D = 1.5$  时, 速度已达到  $0.4U_0$ 。
- c) 红线两条点划线间标出了  $x/D = 0.5$  与  $x/D = 2.0$ , 时均流速最大值的变化趋势, 可以看到, 其流场时均流速的最大值的横向位置在随着远离圆柱区而向外移动, 同时其幅值也相应减少。至  $x/D = 2.0$  时, 红线标出处已不在是一个峰值, 而变成了均匀过度。

图3-49为椭圆柱尾流区横向 X 方向无因此时均速度纵向分布图 (远椭圆柱尾流区), 与上一小节中圆柱一致, 共选取了4个典型截面。从图中我们可以得出大致与圆柱绕流流场相同的特点, 在黑色点划线框标出的区域中出现了 X 方向无因此时均速度的波动。

### 3.2.3.2 椭圆柱周围的瞬时流场

与上一节中圆柱周围的瞬时流场分析方法一致, 为了更好地认识椭圆柱绕流的泄涡过程, 此处亦选用两种方式, 即涡量图的形式与流线追踪对的形式来表达这一个非定常的过程。图3-50至图3-57为涡量图的形式表现了椭圆柱绕流在一个周期内的涡脱落的过程, 其中虚线部分表达的是负涡量, 实线部分表达的是正涡量。

下面八张图片显示了流体经过椭圆柱, 发生泄涡现象的完整一个周期内不同时刻椭圆柱周围的涡量分布图, 从图中可以看出如下规律:

1. 在靠近椭圆柱尾部表面处由两侧剪切层包裹的区域内, 通圆柱一致, 存在着一对一直相互竞争的正反涡量对, 此正反涡量对永不脱离椭圆柱尾部表面, 但相较于圆柱来说, 此正反涡量对的“能量差”以及正反涡量对的交接零涡量点在椭圆柱尾部表面移动幅度都相对较小, 这也解释了椭圆柱脉动升力系数与脉动阻力系数较小的原因。
2. 同时椭圆柱由于厚度比变小, 分离点后移, 导致后方剪切区长度比之上一节中圆柱的剪切区来的更远, 这也解释了椭圆柱后面回流区较之上一节中圆柱来的长的原因。

同时其形成成熟并逐渐开始脱离的漩涡距椭圆柱本身的距离较之上一节中的圆柱亦来的远, 这意味着其受到内部正反涡量对的影响, 以及对于正反涡量对的影响都相对较弱, 导致了漩涡从“萌芽”至成熟阶段互相切割, 挤压直至脱离影响较弱, 故从涡量图上就可以直观的发现, 椭圆柱绕流近结构物尾流区内泄涡横向扩散距离远远小于上一节的圆柱绕流。即在“横向 X 方向无因此时均速度分布图”中所示, 椭圆柱最大平均无因此速度小于圆柱, 红线之间箭头所指的距离也小于圆柱。

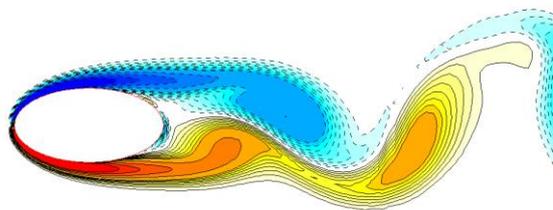


图3-50 一周椭圆柱泄涡涡量图 (7.1436s)

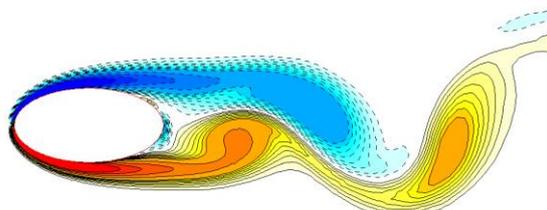


图3-51 一周椭圆柱泄涡涡量图 (7.158s)

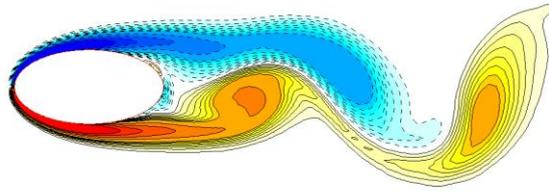


图3-52 一周期椭圆柱泄涡涡量图 (7.1712s)

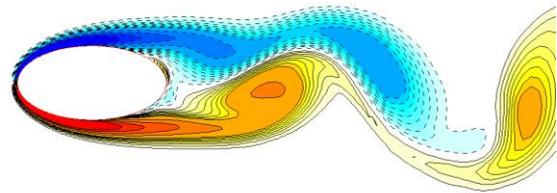


图3-53 一周期椭圆柱泄涡涡量图 (7.1868s)

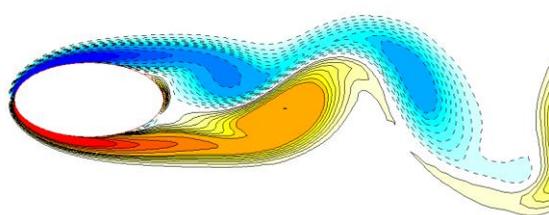


图3-54 一周期椭圆柱泄涡涡量图 (7.2036s)

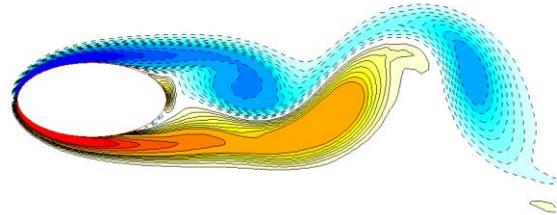


图3-55 一周期椭圆柱泄涡涡量图 (7.2252s)

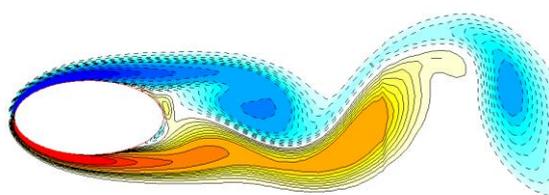


图3-56 一周期椭圆柱泄涡涡量图 (7.2408s)

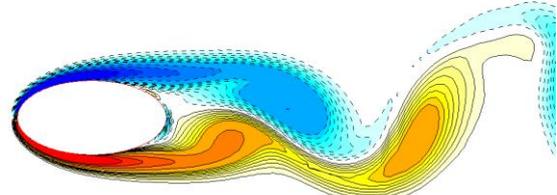


图3-57 一周期椭圆柱泄涡涡量图 (7.2636s)

从下图3-58至图3-65中，我们能非常清晰地观察到椭圆柱绕流过程中涡在剪切层内部的“萌芽”，逐渐生长，并向中心线移动并远离椭圆柱尾部的过程。比较上一节，可以发现椭圆柱“萌芽”生成位置较之圆柱，由于正负涡量对移动距离变小，其离开中心线的相对距离亦随之变小。并更靠近后方。

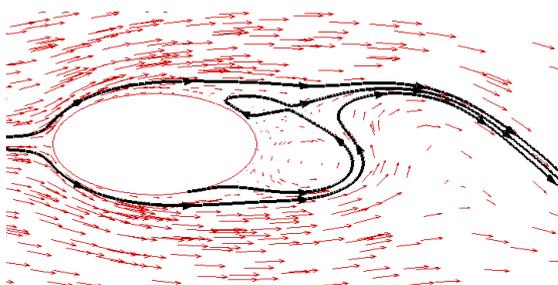


图3-58 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.1436s)

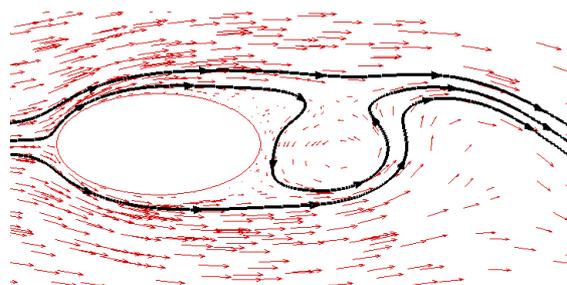


图3-59 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.158s)

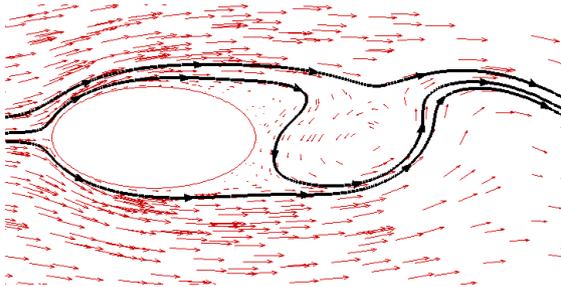


图3-60 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.1712s)

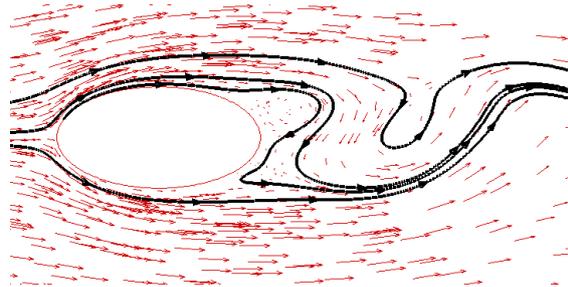


图3-61 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.1868s)

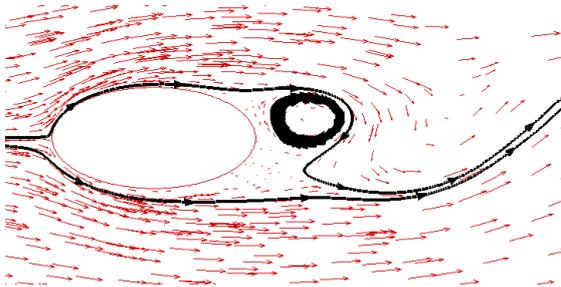


图3-62 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.2036s)

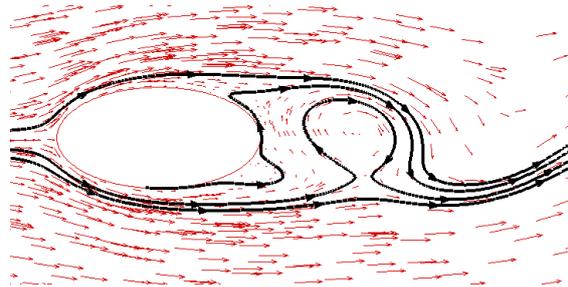


图3-63 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.2252s)

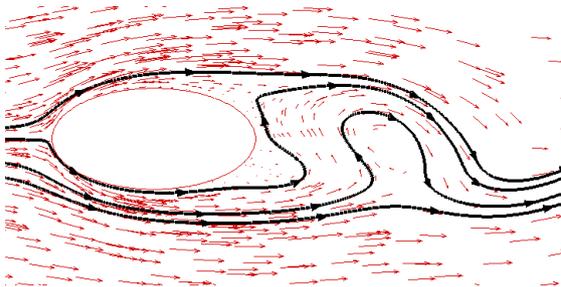


图3-64 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.2408s)

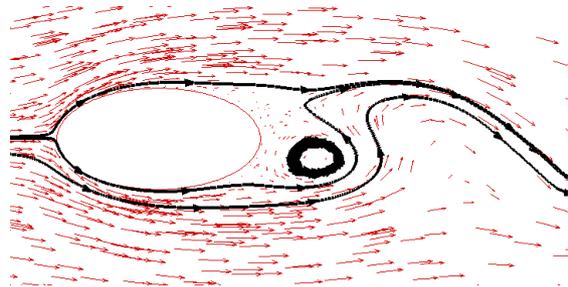


图3-65 一周期椭圆柱泄涡流线图 (7.2636s)

### 3.4 本章小结

本章对二维圆柱绕流，椭圆柱绕流的问题进行了数值模拟研究。首先基于 SST  $k-\omega$  湍流模型采用对雷诺数  $Re = 1000$  的圆柱绕流问题进行二维数值模拟，完成了网格收敛性工作，以及对于去流段等参数对于远流场尾涡捕捉的影响进行了研究，研究表明，SST  $k-\omega$  湍流模型对于远流场尾涡捕捉有着非常大的局限性。然后，采用三维大涡模拟 (LES) 方法对二维圆柱绕流，椭圆柱绕流的问题进行了数值模拟研究，对圆柱，椭圆柱，在本文雷诺数下其尾流场的时均分布与瞬时分布给出了深入分析，尤其是瞬时分布，对于泄涡的整个物理过程给使用了涡量与流线追踪的方法给出了的解释。另一方面，找到了一套可用于远流场双柱体数值的方法。

## 第四章 双柱绕流的数值模拟

上一章节对固定单圆柱绕流,固定单椭圆柱绕流进行了数值模拟,得到了比较完整的钝体水动力以及环境流场的信息,为本章节与之后的论文开展打下了基础。同时,尽管在第一章“绪论”与第二章“研究基础与研究手段概述”中对于就本论文研究的背景,即研究人员发现斑海豹能仅依靠胡须来感知周围水动力信息,从而推断远场环境信息(障碍物,猎物等信息),简要地按照时间顺序介绍了研究人员就这一问题开展的一系列动物行为实验以及从中取得的成就。但是对于每个独立实验中我们能获知何种的对于结构物水动力响应研究的关键参数并没有进行详细展开,故为了更好地阐述本论文研究工作中的数值计算模型的由来以及后续实验设计中秉承的理念,并将对国外生物学家对斑海豹进行的系列动物行为实验的具体进行方式,所得到的结论以及斑海豹主要追踪目标——鱼的游动行为模式等作出了概括性阐述。这对于本章的数值模型以及下一章实验模型的抽象都至关重要。

本章将从斑海豹胡须动物行为实验开始阐述,细致分析斑海豹胡须动物实验结果中发现的研究重点,即斑海豹使用其胡须来进行远流场运动物体循迹的可能的关键水动力参数,并以此为基础一步步抽象出对应的数值模型,并开展模拟计算工作。之后就所得到的计算结构,介绍相关的数据分析方法,从水动力系数方面来寻找规律,推断可能的循迹机理,并之后从结构物流场角度分析特点水动力表现形式的原理。

### 4.1 模型建立

#### 4.1.1 斑海豹胡须动物行为实验的概述

如图1-3以及下图4-1至图4-3所示,斑海豹有着非常发达的面部胡须,其分布形式为面颊两侧,眉毛上方。其特点是长短交错,同时如最长的胡须的长度可达到1-1.5倍头部宽度。



图4-1 斑海豹脸部侧下方视角<sup>[34]</sup>

图4-2 斑海豹脸部侧上方视角<sup>[26]</sup>图4-3 斑海豹脸部正侧方视角<sup>[26]</sup>

如此发达茂盛的胡须系统的存在并不是偶然，它们给予了斑海豹非常强大的感知世界的的能力，为了了解这些胡须系统的神秘能力，Guido Dehnhardt 与上世纪90年代开始就着手于通过斑海豹胡须动物行为实验来破译这个“自然密码”。其首先进行了相关的实验<sup>[18]</sup>，见下图4-4至图4-6。

在实验中，斑海豹在固定在实验区域特定位置，只是为了定量地得到斑海豹头部胡须与目标测试物之间的距离。实验中，研究人员使得振荡小球在相对于斑海豹头部的不同位置以不同频率，不同速度，不同幅值等在水中做上下振动，激起不同形式的水波。同时为了排除斑海豹其他的感知能力存在的影响，如其同样发达的视觉能力等，研究人员使用眼罩遮住斑海豹的双眼，使用耳罩遮住其双耳（需要注意的是，在之后的类似的实验中，为了进一步增加难度，耳罩被能不断播放干扰声音的播放设备的耳机所取代，如图4-7所示）。通过这个实验，研究人员发现，斑海豹有能力仅通过其胡须辨别前方物体的位置，振动频率等重要参数，这极大激励研究人员对于这个问题后续的研究热情。

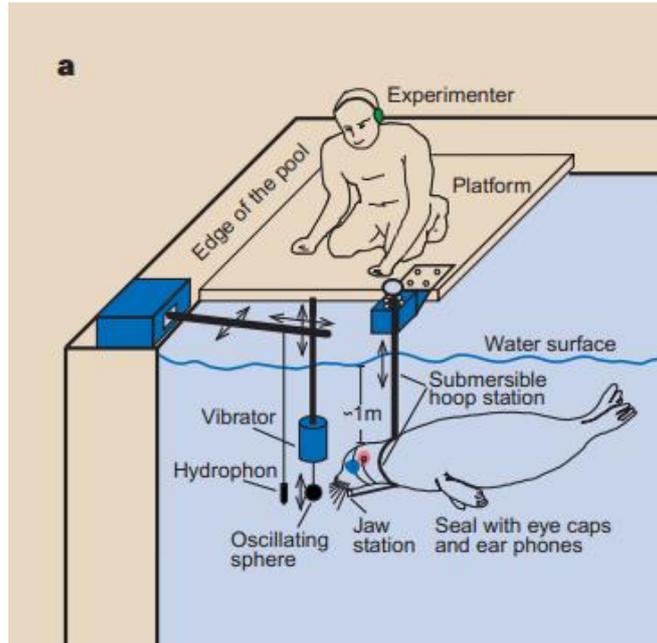


图4-4 实验整体布置情况<sup>[18]</sup>



图4-5 实际实验布置情况<sup>[34]</sup>

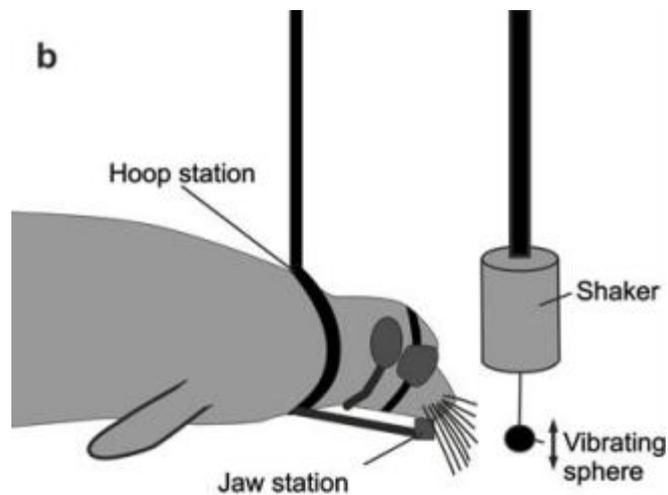


图4-6 实验布置情况（效果图）<sup>[34]</sup>



图4-7 实验中斑海豹的耳机<sup>[33]</sup>

之后，研究人员就上一个实验中所得到的结果，进一步设计并进行了针对斑海豹识别不同形式物体的能力以及斑海豹对于物体运动离开后滞留流场的感知能力的实验，如下图4-8至图4-11。

实验中，研究人员使用了不同形式的柱体试件（不同形状，不同尺寸），通过电机使试件在实验水域范围内旋转一周，然后等待特定长度的时间，打开实验水域供斑海豹进入的探知的入口（此入口仅仅允许斑海豹头部进入，这是为了定量地固定实验中待变参数——斑海豹胡须距离试件初始运动的位置距离），并训练失去视觉，听觉等能力（同最初的实验，眼睛，耳朵皆被相应罩子遮蔽）的斑海豹自主进入实验水域的能力，从而考察斑海豹通过胡须来获取不同形式物体在运动离开后滞留流场，从而分辨前方结构物的感知能力。实验结果发现，斑海豹有非常强的能力从滞留流场中获取信息能力，即斑海豹的胡须的灵敏度能分辨非常细小的水质点波动。

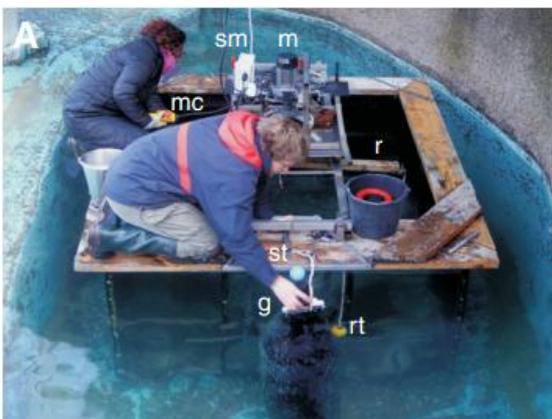


图4-8 实验水域环境<sup>[23]</sup>



图4-9 实验中柱体试件旋转设备<sup>[23]</sup>

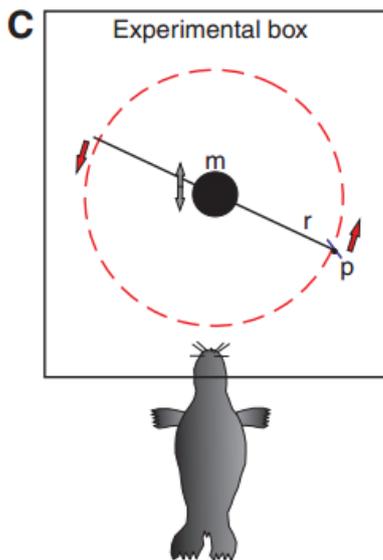


图4-10 实验原理效果图<sup>[23]</sup>

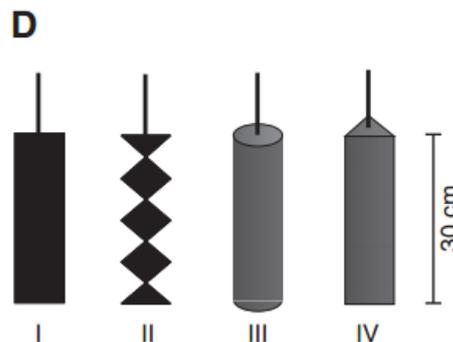


图4-11 不同形式的柱体试件<sup>[23]</sup>

在真实环境中，斑海豹在感知流场的情况下并不是一动不动的，恰恰相反的是，其是在做较高速的迅游活动，同时斑海豹常使用其胡须来识别，追踪远方的鱼类，故研究人员在此基础上又一次设计了相关的实验，见下图4-12至4-17。实验前，研究人员首先训练斑海豹识别分辨一个小型无人水下运载器 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 的推进流场，即实验中，使斑海豹在丧失视力与听力的情况下追踪 AUV。实验中，首先控制使斑海豹在出发点待命，操作 AUV 以不同轨迹行进，在进过不同时间，AUV 完成不同路径之后，放开斑海豹，观察其追寻移动目标流场，寻找目标的能力。实验发现斑海豹完全有能力成功分辨远处 AUV 的活动情况从而追踪并赶上目标，实验还发现的是，在线性轨迹中，由于池壁的限制，在尾迹突变，或猛然消失的时候，斑海豹追踪能力大大降低，甚至丧失，同时对于非线性的轨迹追踪，斑海豹并不会寻找最近路径来找到目标，而是一定会通过追寻并跟随 AUV 推进尾迹来进行寻找。即我们可以得到结论，斑海豹是通过探寻前方目标的尾迹流场来追寻目标的。值得一提的是，实验中，研究人员曾放开斑海豹视觉与听觉能力，而实用面罩遮蔽胡须，但是阻断胡须与水的相互作用，此时斑海豹循迹能力完全丧失，故进一步印证了斑海豹是通过其胡须采集水中流体信息，从而完成识别，循迹等任务。



图4-12 斑海豹试验中的状态1<sup>[20]</sup>



图4-13 斑海豹试验中的状态2<sup>[20]</sup>

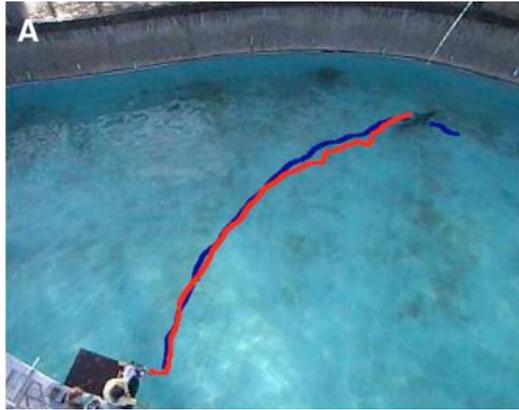


图4-14 斑海豹完成线性循迹<sup>[23]</sup>

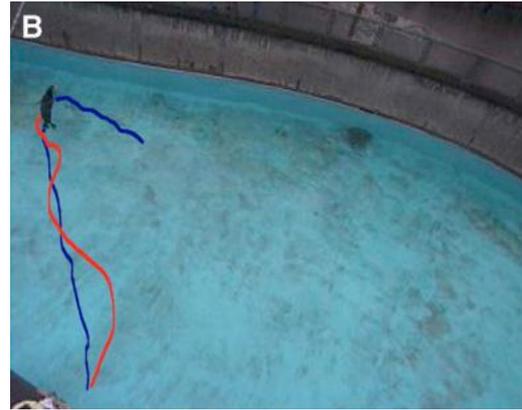


图4-15 水域限制，斑海豹完成部分循迹<sup>[23]</sup>

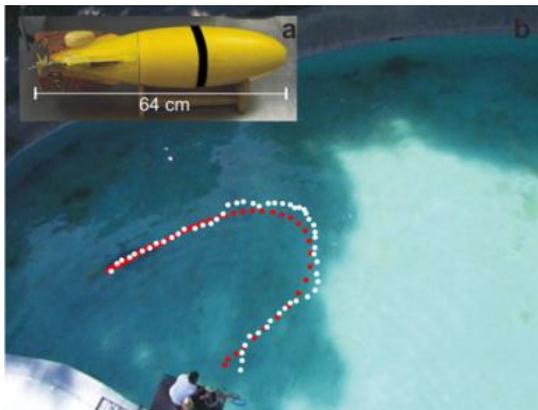


图4-16 斑海豹完成非线性循迹轨迹<sup>[25]</sup>

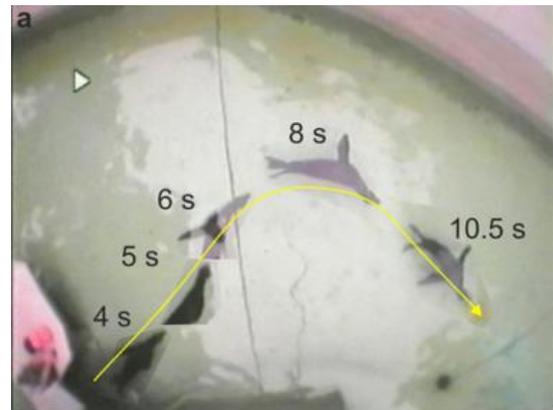


图4-17 斑海豹完成非线性循迹位置图像<sup>[25]</sup>

在确认斑海豹是通过使用胡须探寻前方目标的尾迹流场，采集水中流体信息，从而完成识别，循迹等任务的结论之后，留下来的疑问就是，斑海豹是追寻尾迹之中何种的水动力信息从而完成上述一系列任务的，尤其是在自然环境中，斑海豹能出色的完成识别前方鱼的种类，方位等信息。

近年来，随着仿生的兴起，对于鱼类游动的研究与认识有了进一步的深入，研究发现，大部分鱼类游动在其尾迹之中往往会留下一系列各自不同漩涡<sup>[30, 44, 62, 63]</sup>，其形式取决于鱼类的种类，游动方式等，如下图4-18至图4-20实验研究图4-21数值模拟所示。



图4-18 RoboTuna 实验照片，可以清楚的看出，在尾流中包含了一系列漩涡<sup>[62]</sup>



图4-19 鱼摆尾过程中尾流中包含了一系列漩涡<sup>[62]</sup>

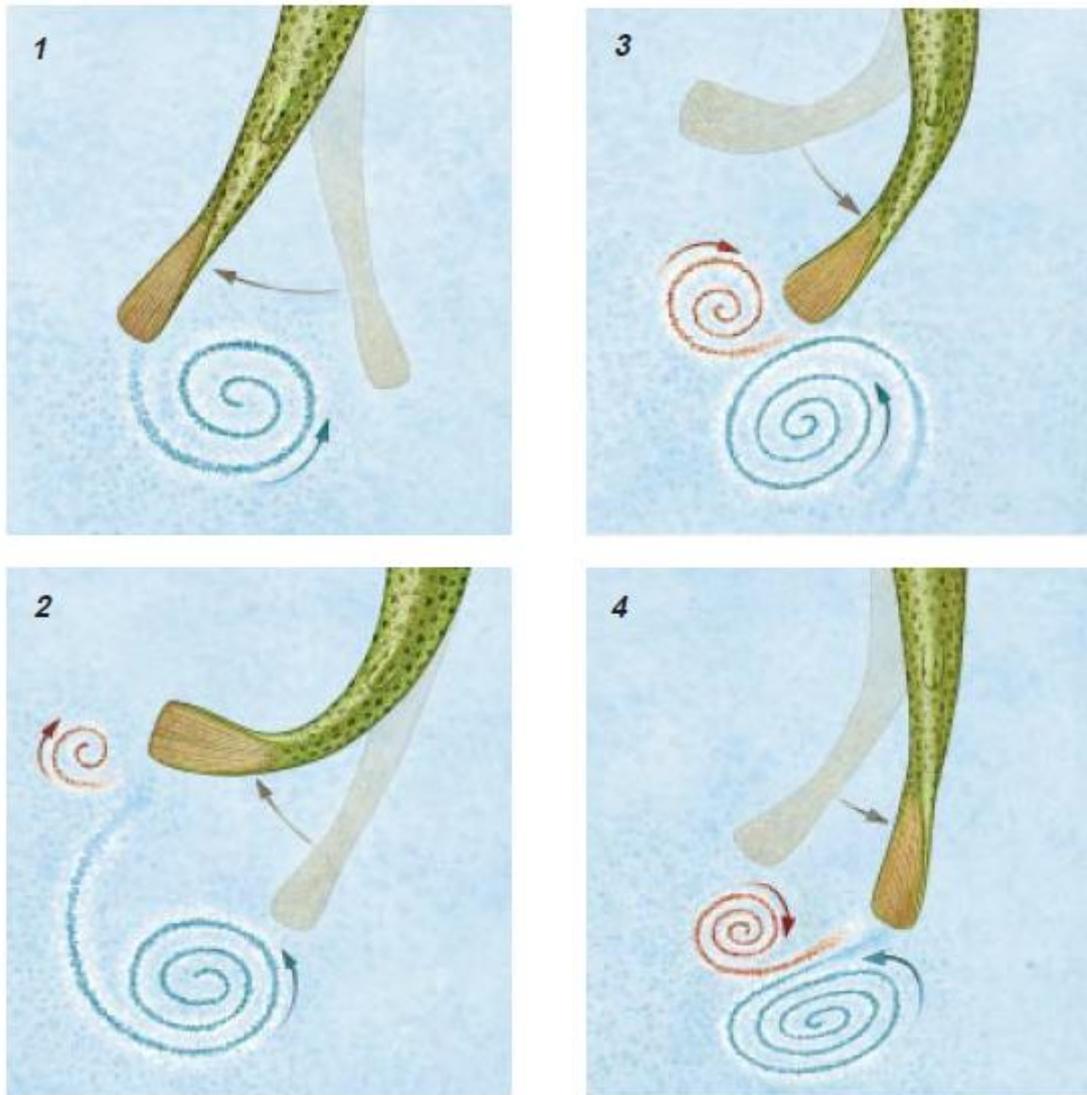


图4-20 鱼摆尾过程中漩涡生成机理<sup>[62]</sup>

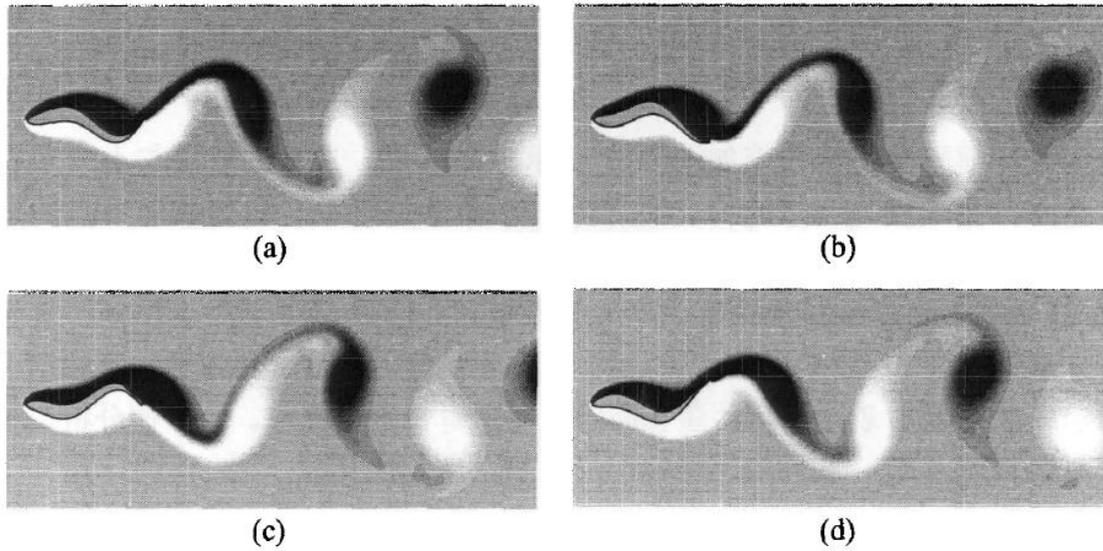


图4-21 鱼类游动数值仿真结果<sup>[44]</sup>

那斑海豹是否在探寻前方目标的尾迹流场过程中就是使用胡须与这些流迹中漩涡相互作用，从而获取信息的呢？为此研究人员以此为基础结合第二类实验，重新设计实施了关于仿造鱼类尾鳍生成尾涡的实验过程以供斑海豹进行探寻，见下图4-22至图4-23

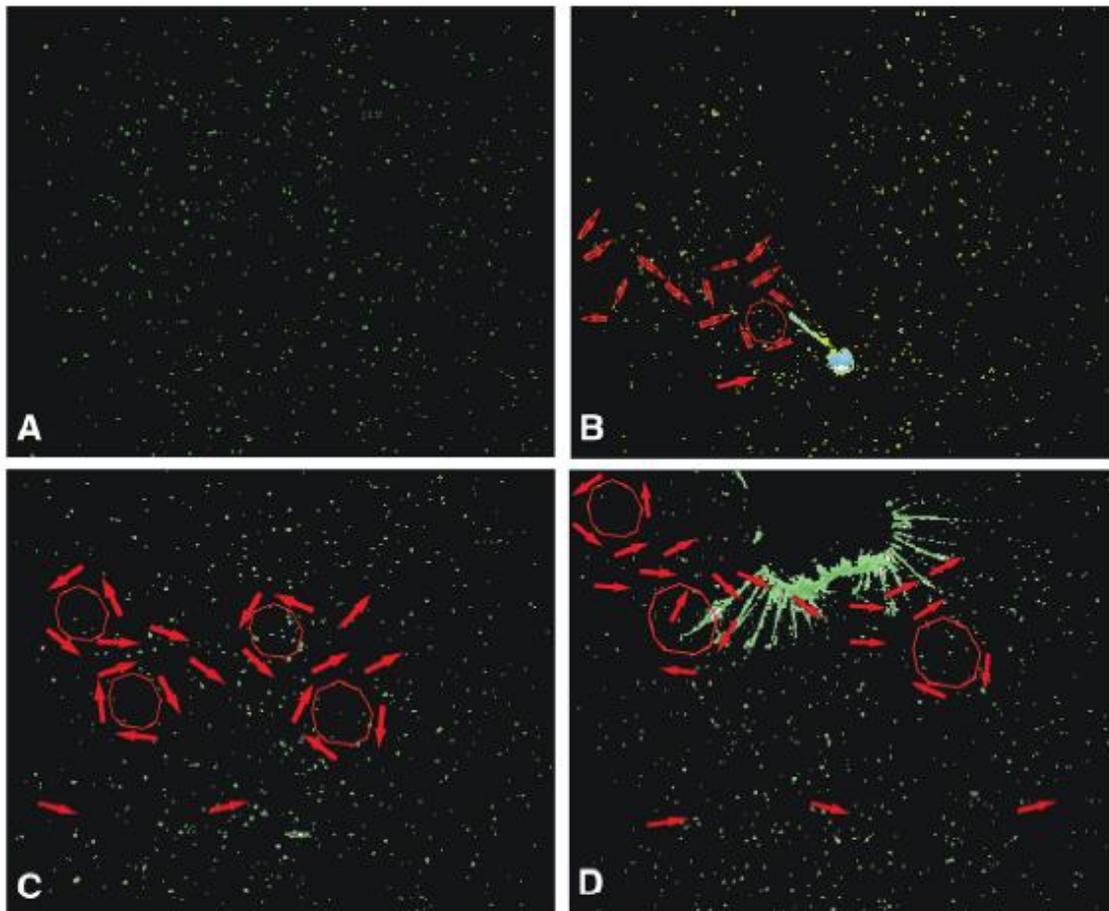


图4-22 实验 PIV 观察：海豹胡须与漩涡相互作用<sup>[21]</sup>



图4-23 实验中使用的仿造尾鳍<sup>[21]</sup>

由系列图4-22可以清晰地看出斑海豹胡须与漩涡相互作用的过程：在 a 图中实验水域还没有发生扰动，故水中质点平静；b 图中仿造尾鳍扰动，漩涡开始生成；c 图中，仿造尾鳍停止运动，尾流场开始扩散，漩涡开始弥散，这段时间为滞留时间；d 图中，斑海豹进入实验水域环境，可以很明显的看出，斑海豹在移动头部的过程中，非常有意识的让自己的胡须尽可能多地接触流场中的漩涡。尽管仿造尾鳍与真实鱼类游动还有很多的差别，但是斑海豹通过胡须与漩涡来作用进行远流场运动物体循迹推论得到了验证。同时在实验中有一点还值得注意的是，斑海豹胡须探寻漩涡的过程中，其有意识地将胡须尽可能的绷直，使其能探寻到自身头部较远的漩涡，同时使胡须尽可能小的颤动。

从上面的所有实验描述我们可以得到关于斑海豹使用胡须进行远流场运动物体循迹的关键点，即追寻前方物体尾迹，同时可以推断其主要机理为通过识别自身的胡须与前方物体尾流中的漩涡结构中的响应。

#### 4.1.2 数值模型的建立

##### 4.1.2.1 模型建立

在上一节中我们已经较完整地阐述了斑海豹生物行为实验所提供的信息，提取信息并抽象，得到了研究重点，即通过某特定结果物的响应从而获取环境流场信息，继而推断出远前方结构信息（结构形式，大小，位置，运动方式等）。

现计算模型中，前方取为圆截面结构形式，其作用为取代鱼类模型，用于生成后方包含稳定的涡街的尾流场，故此处圆柱被定义为“尾流场生成器”。不得不提的是，尽管较之真实鱼类，甚至仿造鱼鳍，圆柱绕流生成的尾涡形式与之有很大的差别，但是考虑到计算资源的限制；加之现在的研究成果对于圆柱绕流的尾流有了较为清晰的认识，这样更有助于对于此问题进行后续的机理分析，故此选择圆截面为所有计算工况生成条件一致的尾流区是合理的。同时选取典型的海豹胡须截面形式厚度比  $\tau = 0.5$  椭圆截面，长轴沿来流方向放置。在每一个工况中，分别改变两柱体之间的横向与纵向距离，故而可获得如下图4-24的计算模型。

其中上游圆柱的直径选为  $D = 5\text{mm}$ ，而下游椭圆柱的长轴为  $A = D = 5\text{mm}$ ，短轴为  $B = D/2 = 2.5\text{mm}$ 。

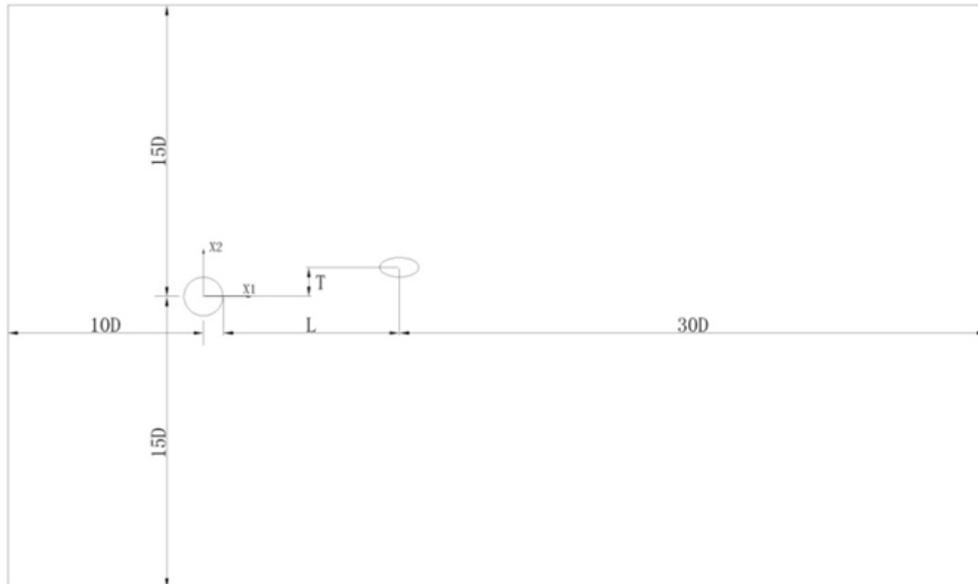


图4-24 双柱绕流二维计算模型

图中  $L$  为两柱体之间的纵向距离，被定义为后方椭圆柱中心至前方圆柱的最近纵向距离。同时  $T$  为两柱体之间的横向距离，被定义为后方椭圆柱中心至前方圆柱的中心的横向距离。本论文中  $L$  从  $6D$  至  $18D$  每  $3D$  变化， $T$  从  $0$  至  $D$  每  $0.25D$  变化，故一共正式计算工况为  $27$  个（其中包含两个辅助验证工况）。

#### 4.1.2.2 网格划分

上一章已经对圆柱和椭圆柱划分有了充分的阐述，故此处经绘制出全部流场情况，不做详述，见下图4-25。

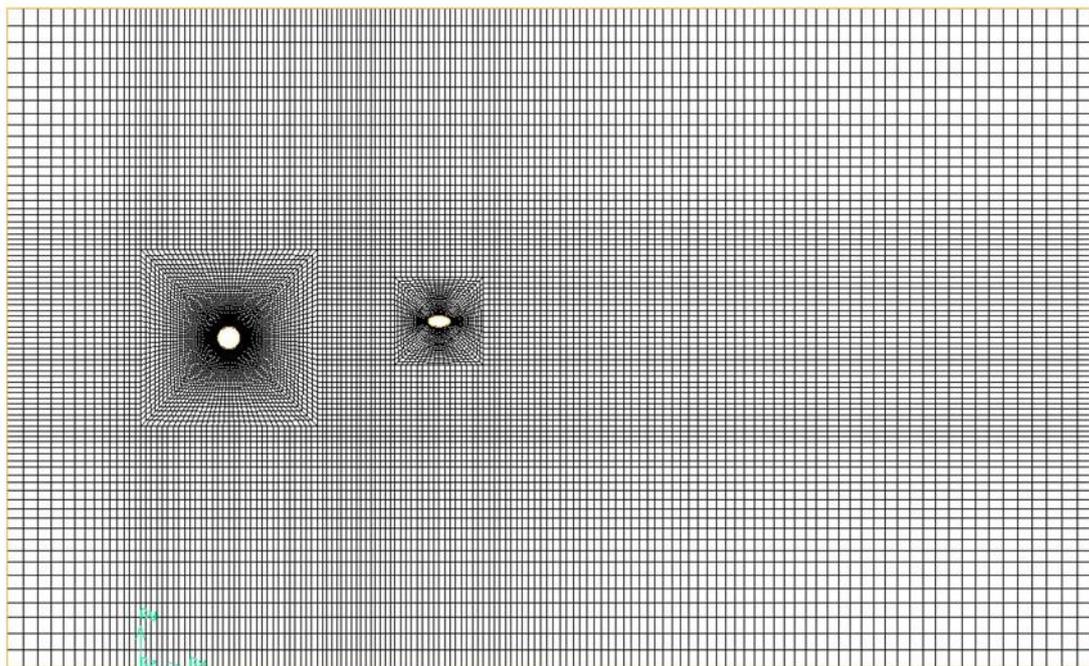


图4-25 计算区域网格划分（真实网格远比上述图像所示稠密）

对于斑海豹来说，其平时平均巡游速度在0.5 m/s，其真实胡须的典型截面短轴长为  $B = 0.5\text{mm}$ ，故对于真实海豹胡须其雷诺数为  $Re = 250$ ，有此可得在计算流速  $U_0 = 0.1003\text{m/s}$ ，也意味着前方圆柱雷诺数为  $Re = 500$ 。故各个边界条件设置如下：

1. 入口：速度入口（velocity inlet），设定常流速  $U_0 = 0.1003\text{m/s}$ ；
2. 出口：出流边界（outflow）；
3. 上下面：对称边界（symmetry）；
4. 圆柱表面：墙面边界（wall）。

需要注意的是为了是计算更快捷，流体初速度设为入口流速  $U_0 = 0.1003\text{m/s}$ 。

#### 4.1.3 数值验证——前方圆柱受力分析

数值计算可得前方圆柱的  $St$  数，平均阻力系数  $C_{d0}$ ，与一阶泄涡频率一致的脉动升力系数  $C_{l1}$ ，列表如下：

表4-1 双柱绕流前方圆柱计算结果汇总

计算工况	T	L	St	$C_{d0}$	$C_{l1}$
1	0	6	0.227	1.461	1.200
2	0	9	0.227	1.463	1.195
3	0	12	0.227	1.468	1.211
4	0	13	0.227	1.468	1.217
5	0	14	0.227	1.470	1.203
6	0	15	0.227	1.469	1.204
7	0	18	0.227	1.471	1.213
8	0.25	6	0.227	1.451	1.184
9	0.25	9	0.227	1.462	1.197
10	0.25	12	0.227	1.463	1.192
11	0.25	15	0.227	1.469	1.211
12	0.25	18	0.227	1.471	1.214
13	0.5	6	0.224	1.460	1.199
14	0.5	9	0.227	1.456	1.189
15	0.5	12	0.227	1.462	1.191
16	0.5	15	0.227	1.469	1.211
17	0.5	18	0.227	1.472	1.215
18	0.75	6	0.225	1.436	1.188
19	0.75	9	0.227	1.452	1.177
20	0.75	12	0.227	1.463	1.199
21	0.75	15	0.227	1.468	1.207
22	0.75	18	0.227	1.471	1.215
23	1	6	0.225	1.443	1.192
24	1	9	0.227	1.456	1.122
25	1	12	0.227	1.465	1.196
26	1	15	0.227	1.470	1.212
27	1	18	0.228	1.472	1.215

将上表数据与上一节中的单圆柱绕流问题进行比较，可以发现，前方圆柱的  $St$  数，平均阻力系数，脉动升力系数等基本在一个小范围中发生变化，即保证不变。可以得到如下结论：

1. 此时后方圆柱的存在并不影响前方圆柱的水动力表现，这也与 Zdravkovich<sup>[36, 37]</sup>发表的均匀来流中串列等直径双圆柱临界无因次距离直径比为4的结果得到了相互印证。
2. 此处使用的计算方法与网格质量是可行的。

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 后方圆柱水动力分析

#### 4.2.1.1 后方圆柱受力时域特性

图4-26至图4-50为后方圆柱数值计算稳定段阻力系数 $C_d$ ，升力系数 $C_l$ ，扭矩系数 $C_m$ 的时历曲线，时长为稳定段2s。需要说明的是，图例中L代表纵向无因次距离，T代表横向无因次距离，如L6\_T0代表纵向无因次距离为6，横向无因次距离为0，依此类推。

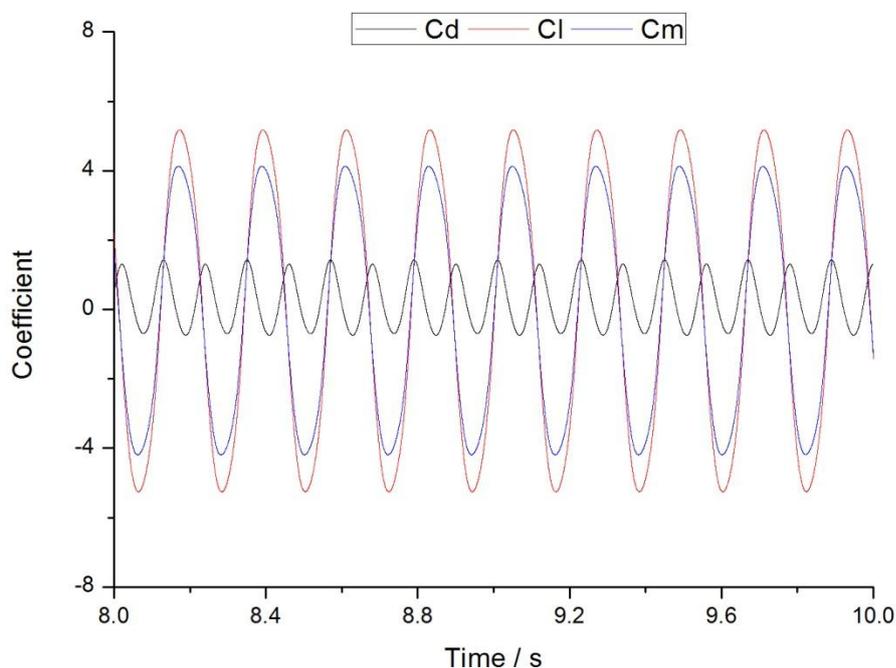


图4-26 受力系数时历曲线 (L6\_T0)

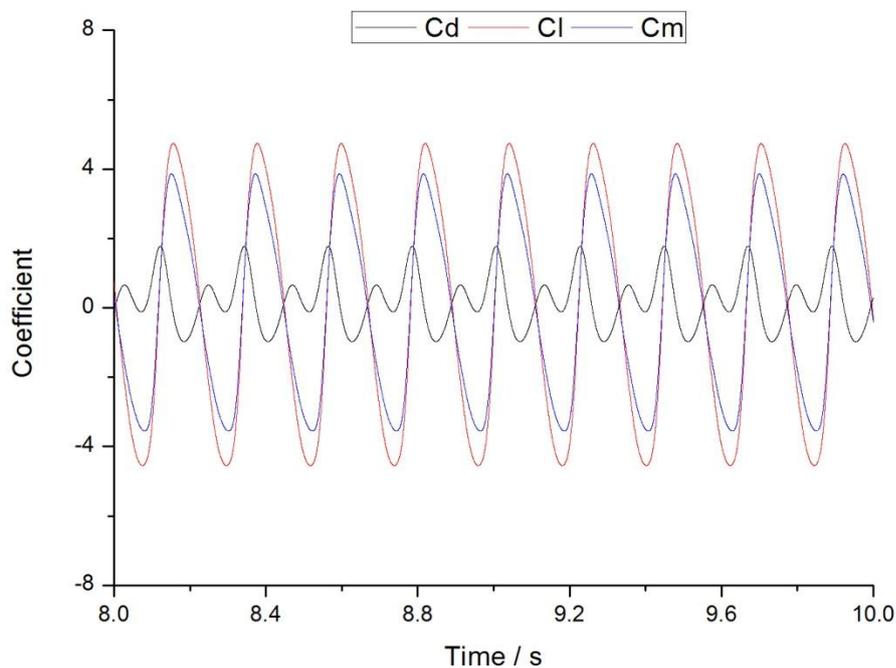


图4-27 受力系数时历曲线 (L6\_T0.25)

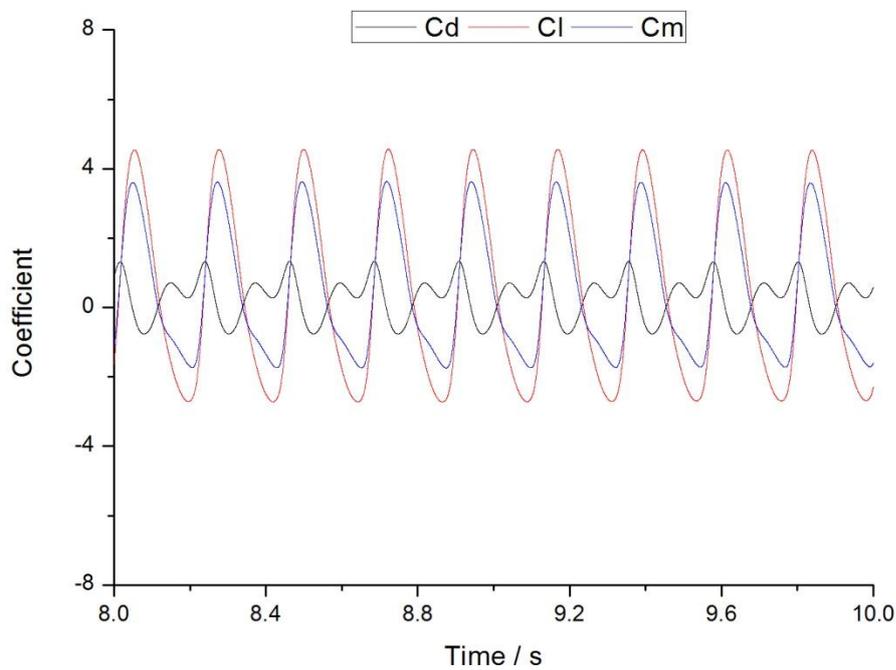


图4-28 受力系数时历曲线 (L6\_T0.5)

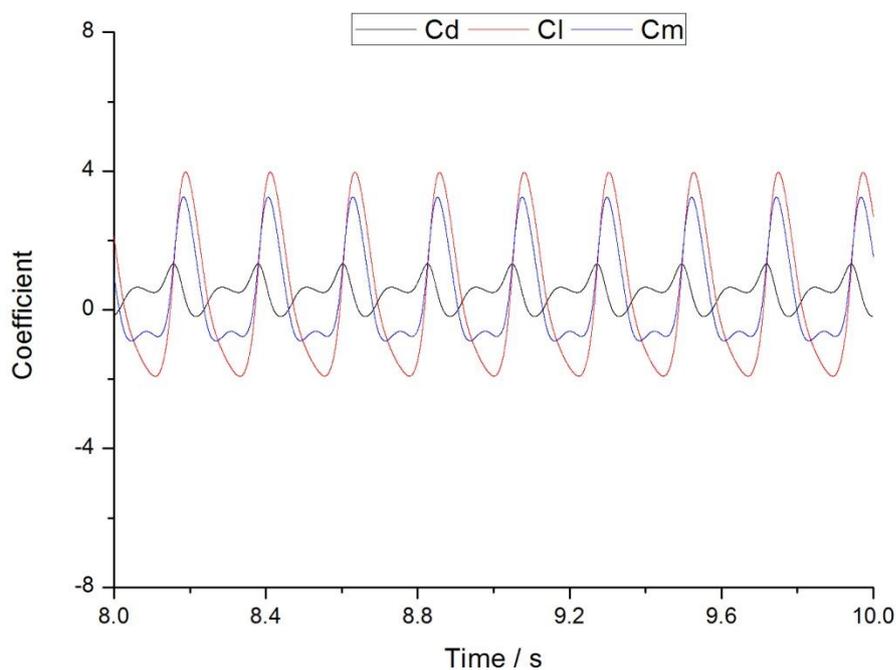


图4-29 受力系数时历曲线 (L6\_T0.75)

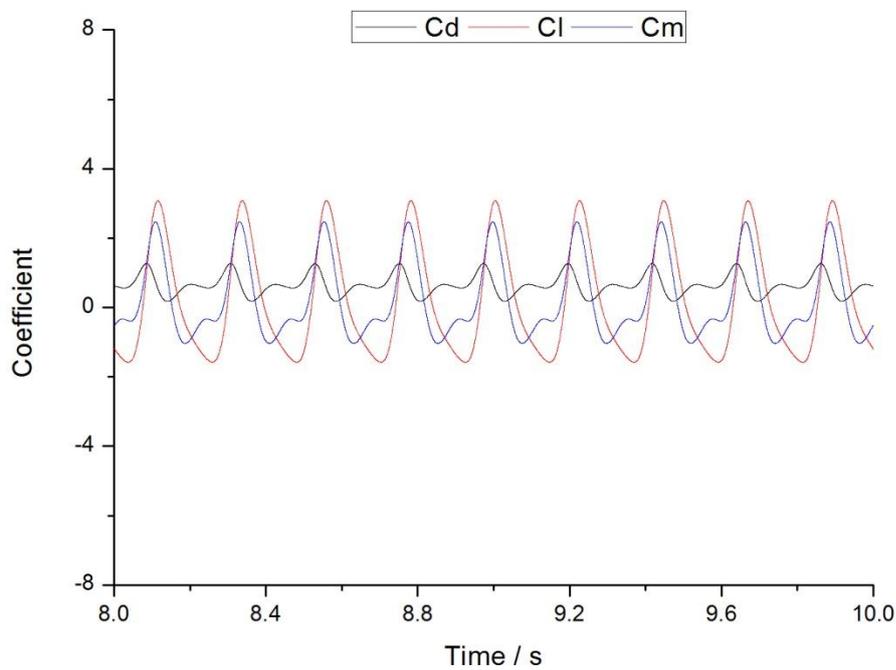


图4-30 受力系数时历曲线 (L6\_T1)

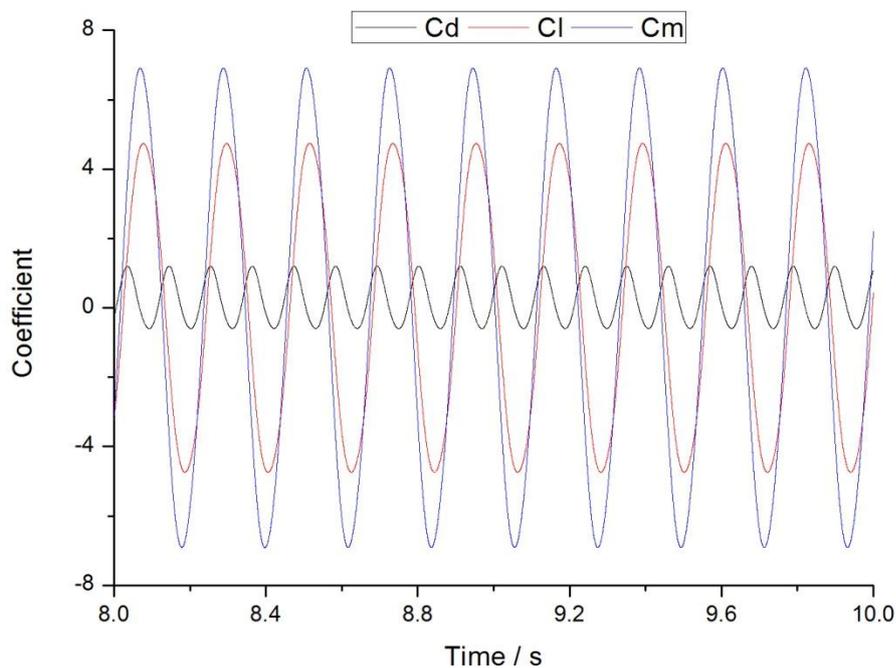


图4-31 受力系数时历曲线 (L9\_T0)

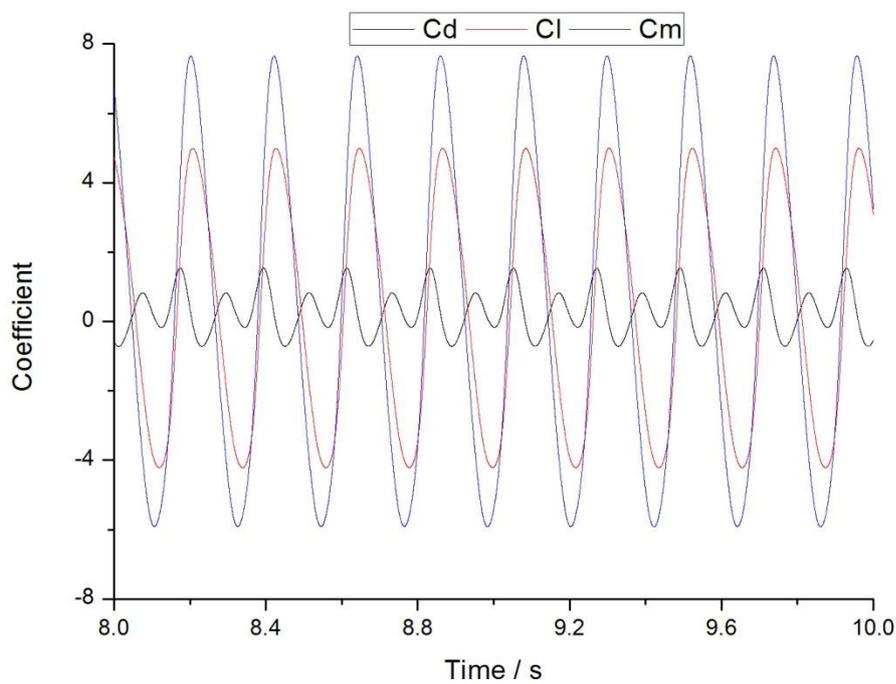


图4-32 受力系数时历曲线 (L9\_T0.25)

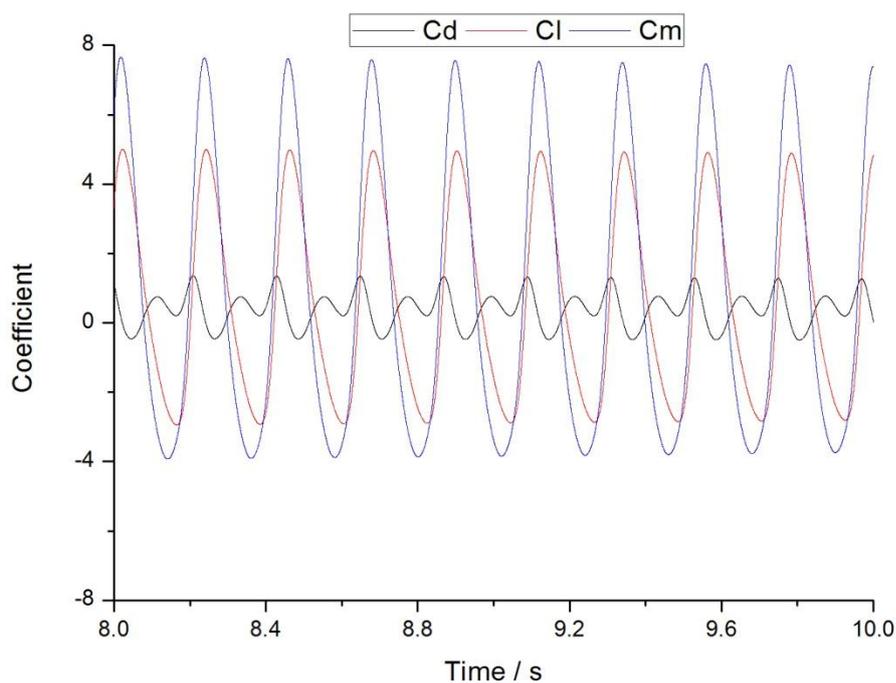


图4-33 受力系数时历曲线 (L9\_T0.5)

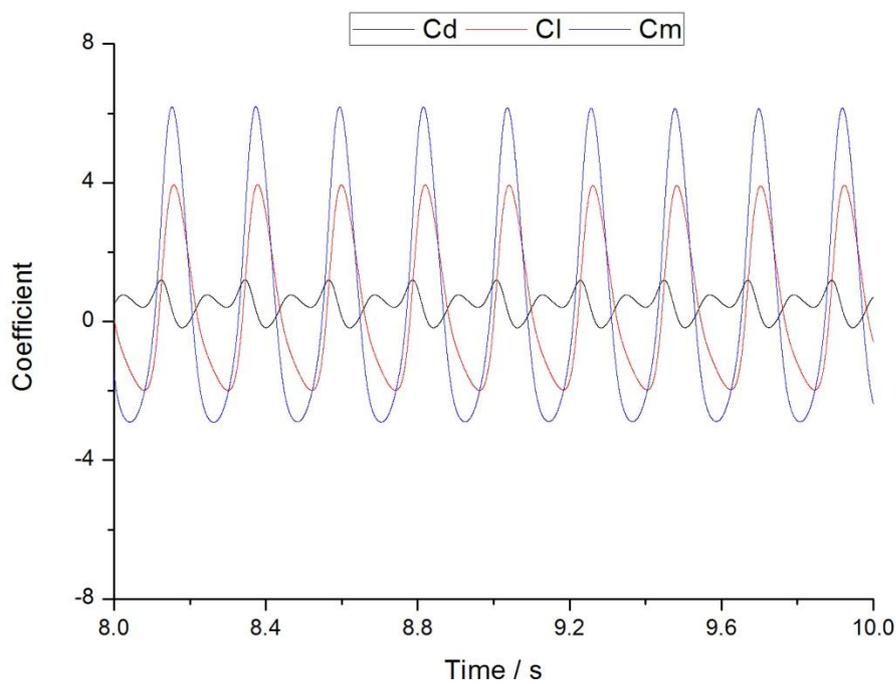


图4-34 受力系数时历曲线 (L9\_T0.75)

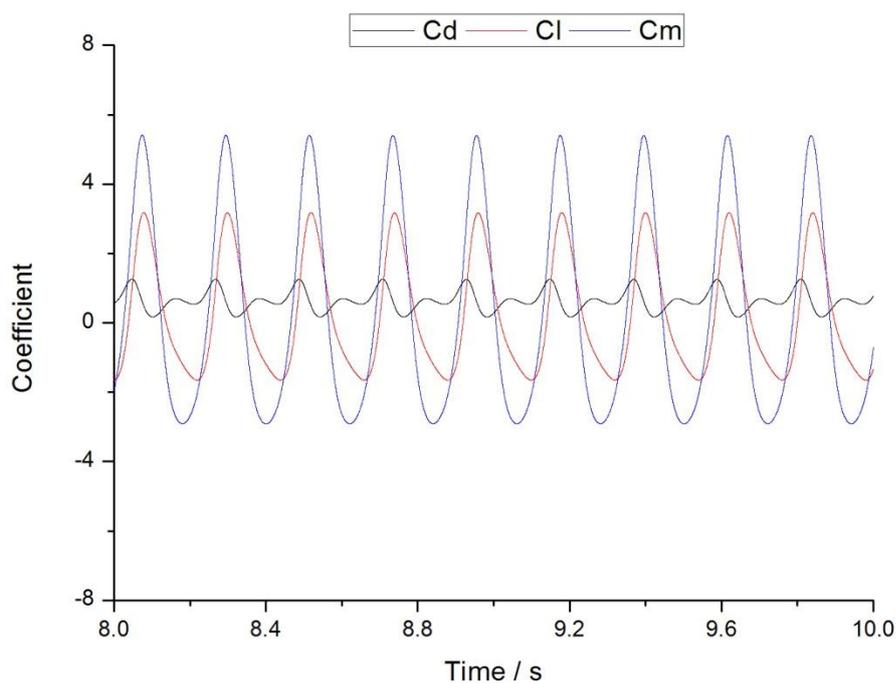


图4-35 受力系数时历曲线 (L9\_T1)

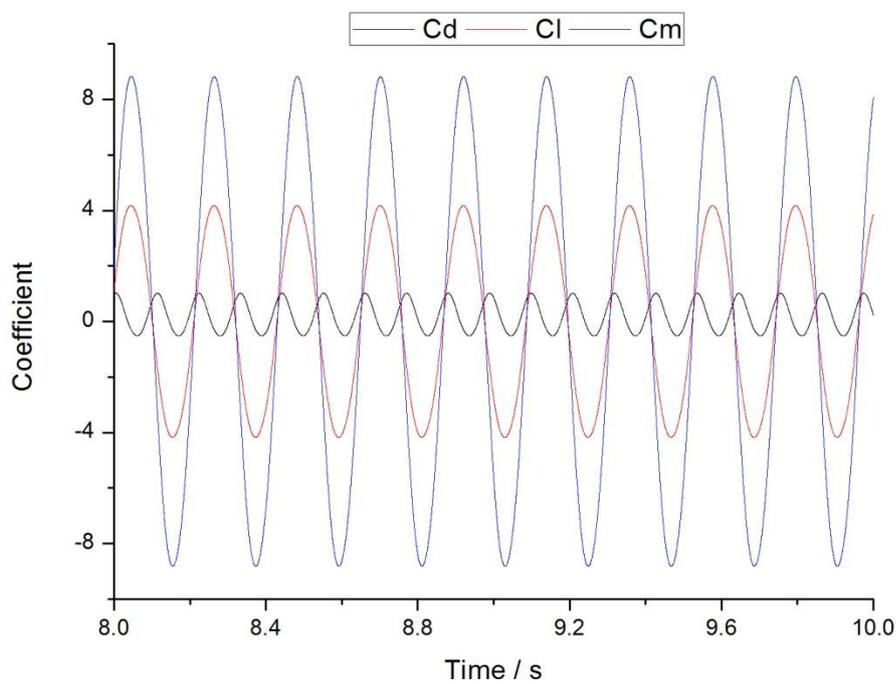


图4-36 受力系数时历曲线 (L12\_T0)

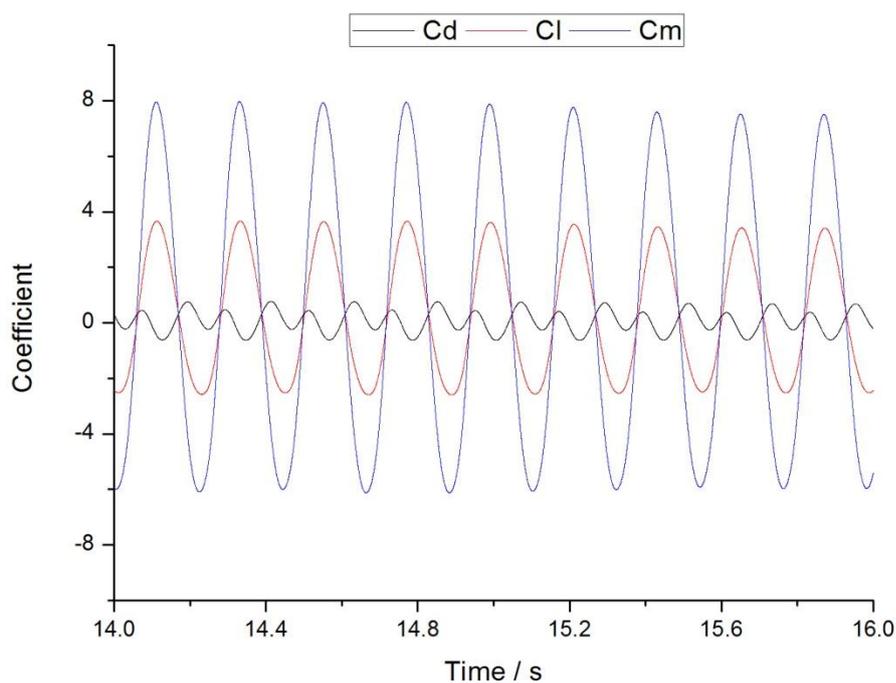


图4-37 受力系数时历曲线 (L12\_T0.25)

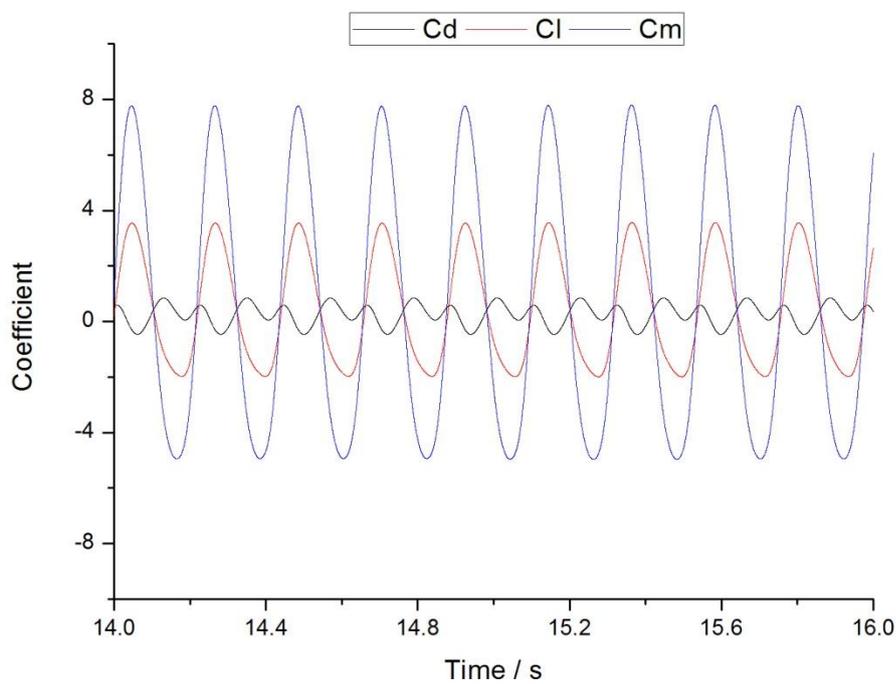


图4-38 受力系数时历曲线 (L12\_T0.5)

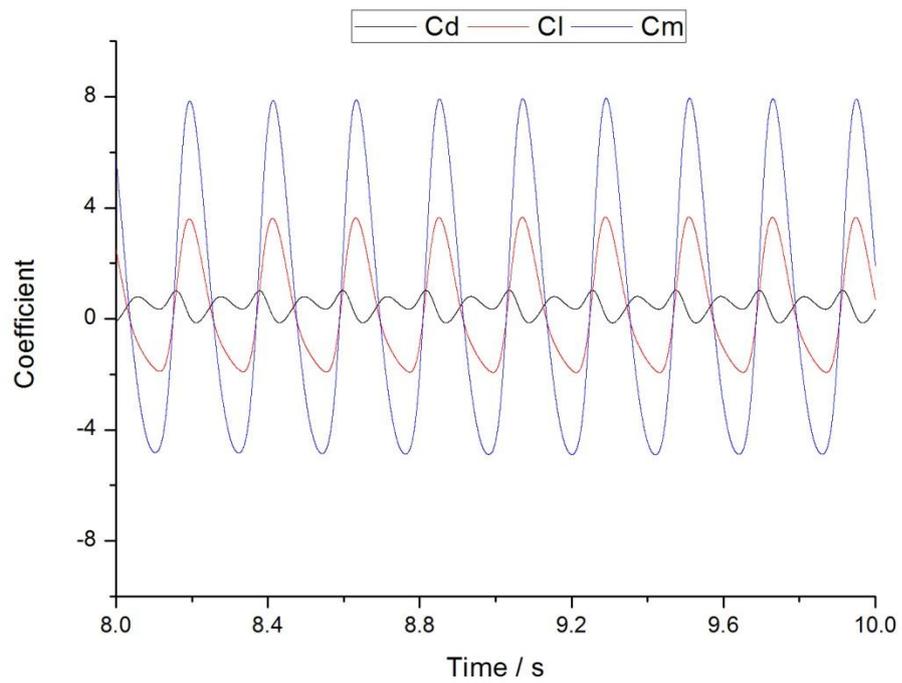


图4-39 受力系数时历曲线 (L12\_T0.75)

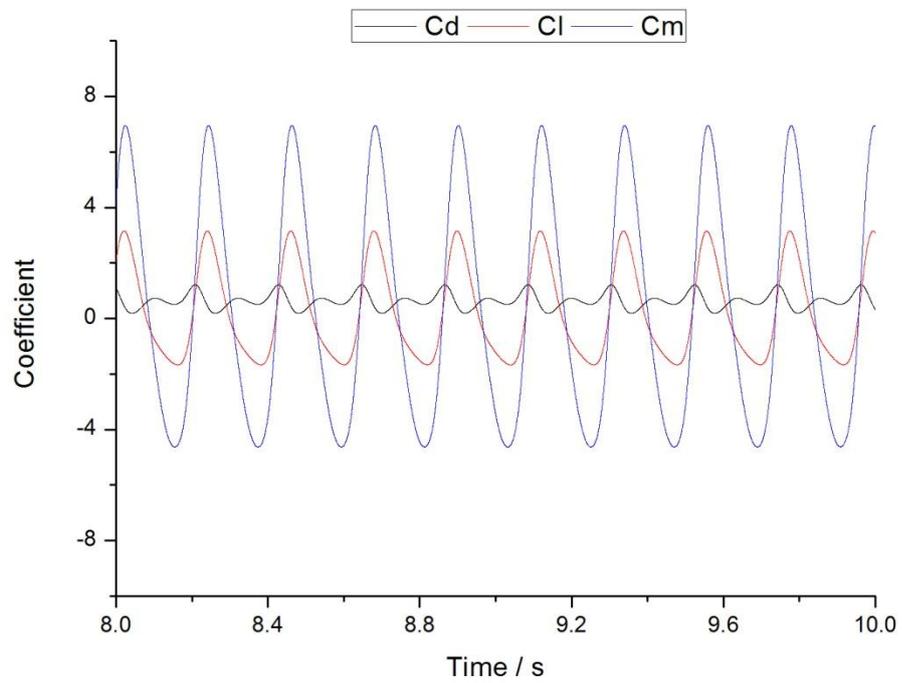


图4-40 受力系数时历曲线 (L12\_T1)

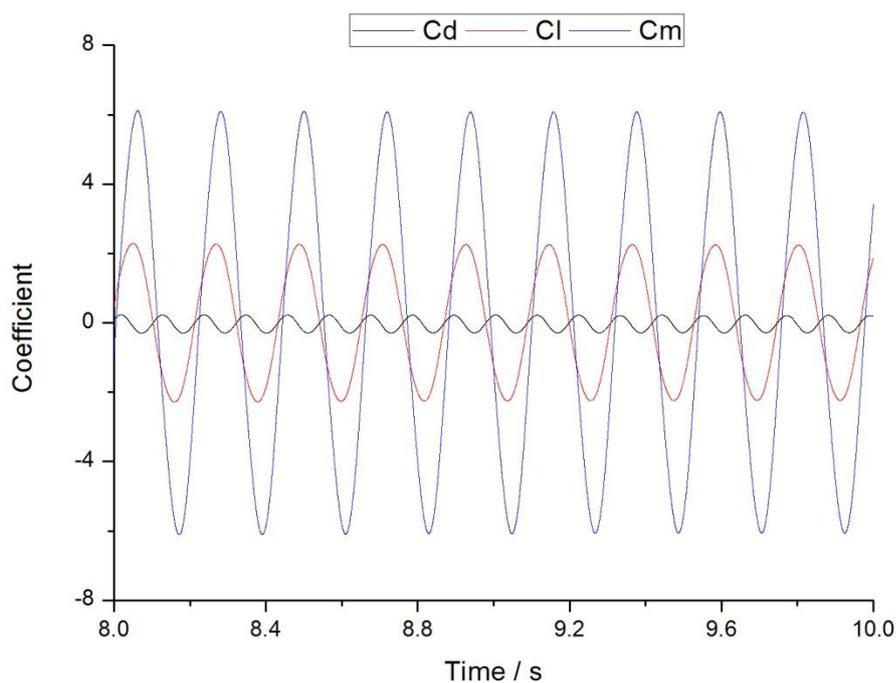


图4-41 受力系数时历曲线 (L15\_T0)

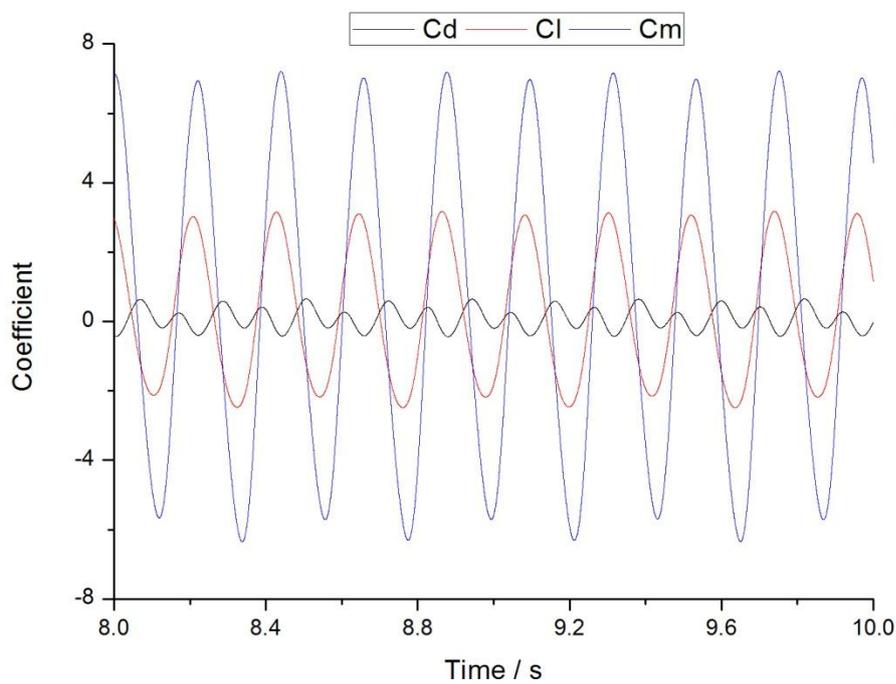


图4-42 受力系数时历曲线 (L15\_T0.25)

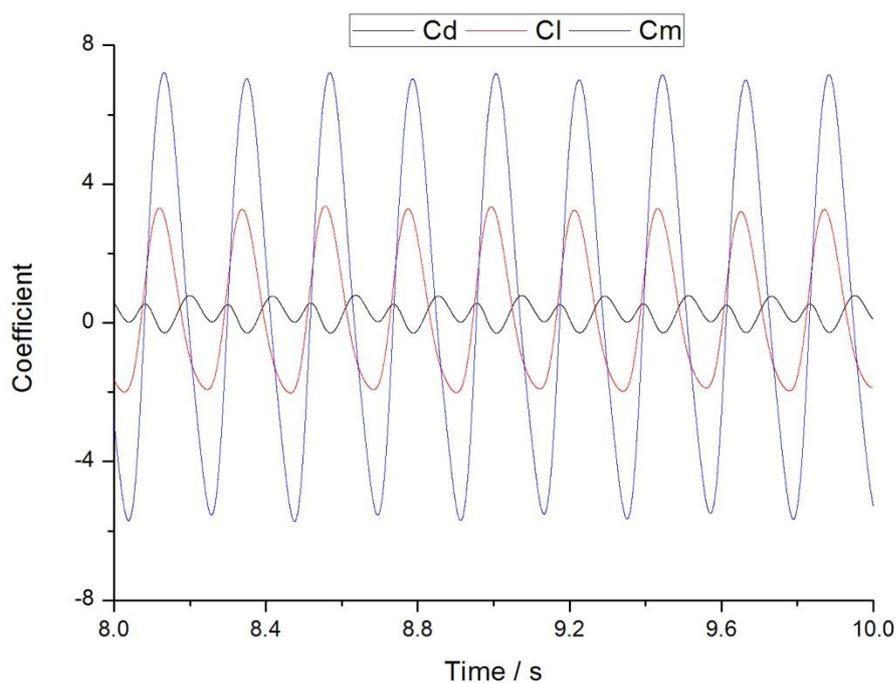


图4-43 受力系数时历曲线 (L15\_T0.5)

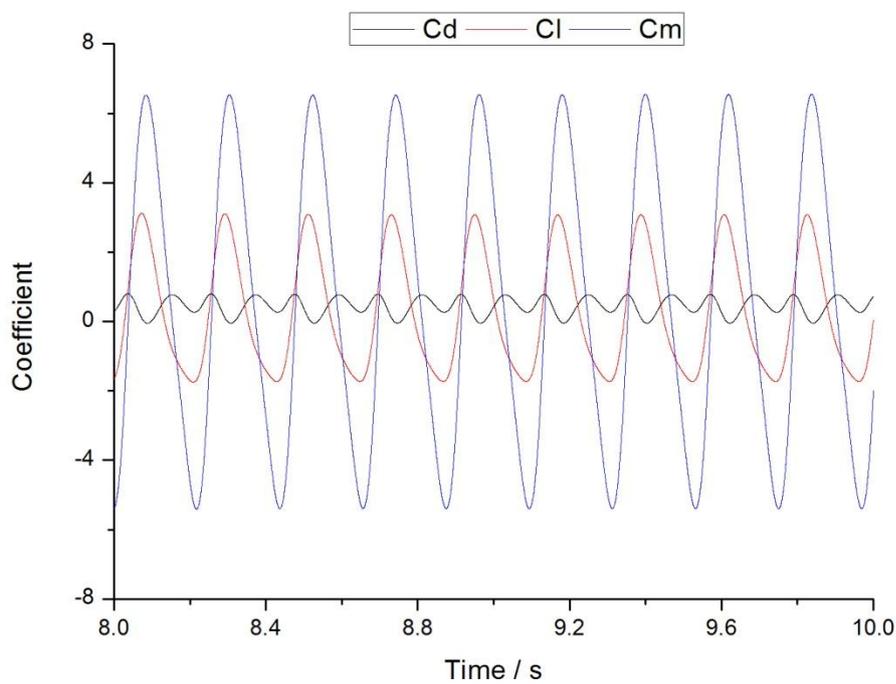


图4-44 受力系数时历曲线 (L15\_T0.75)

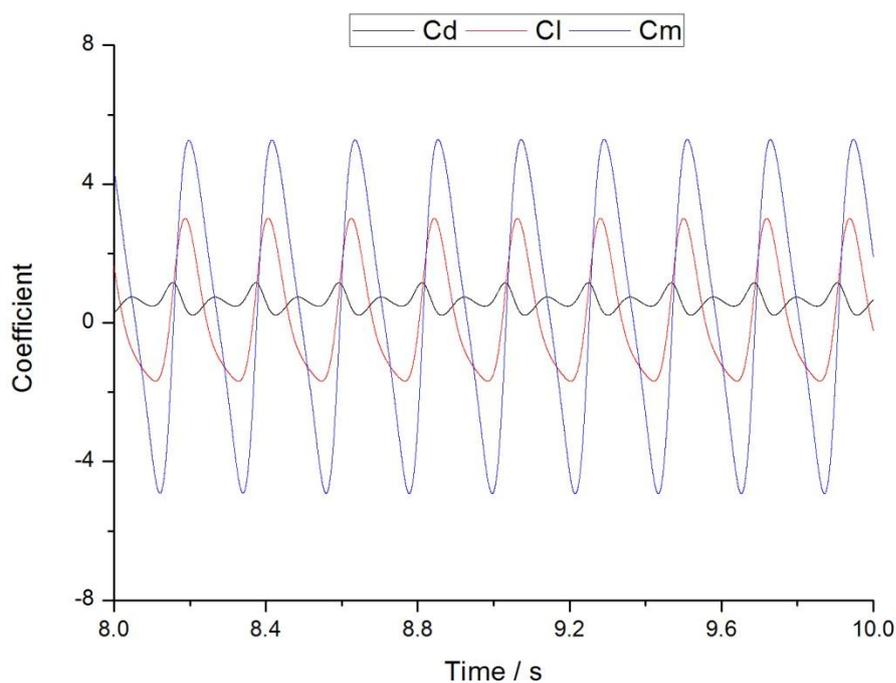


图4-45 受力系数时历曲线 (L15\_T1)

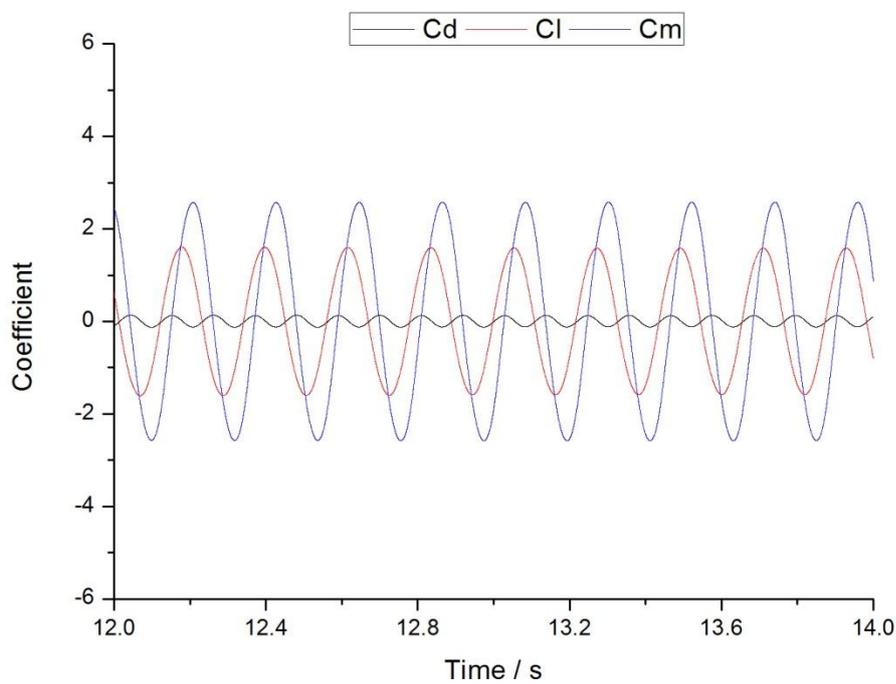


图4-46 受力系数时历曲线 (L18\_T0)

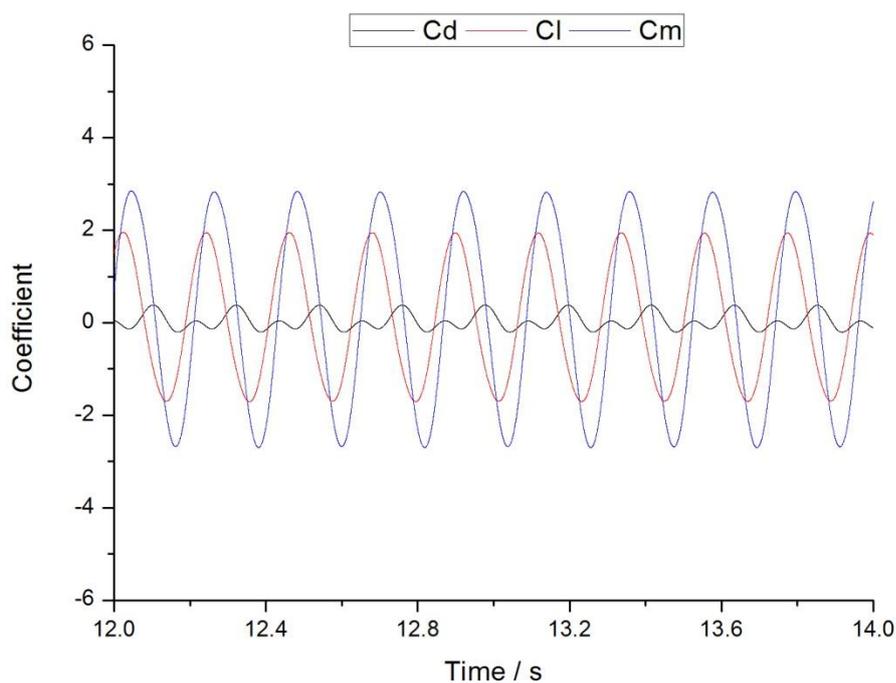


图4-47 受力系数时历曲线 (L18\_T0.25)

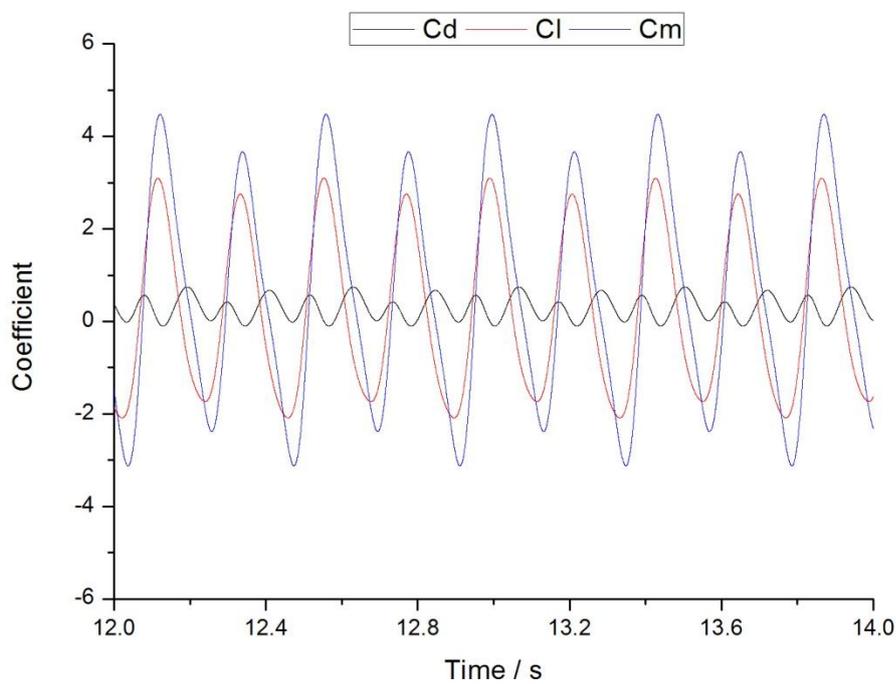


图4-48 受力系数时历曲线 (L18\_T0.5)

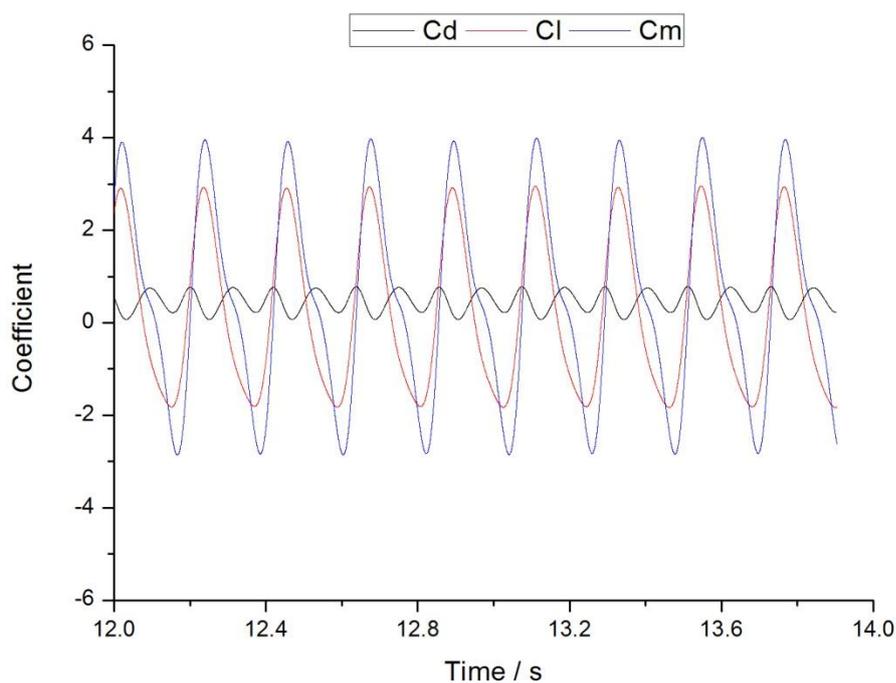


图4-49 受力系数时历曲线 (L18\_T0.75)

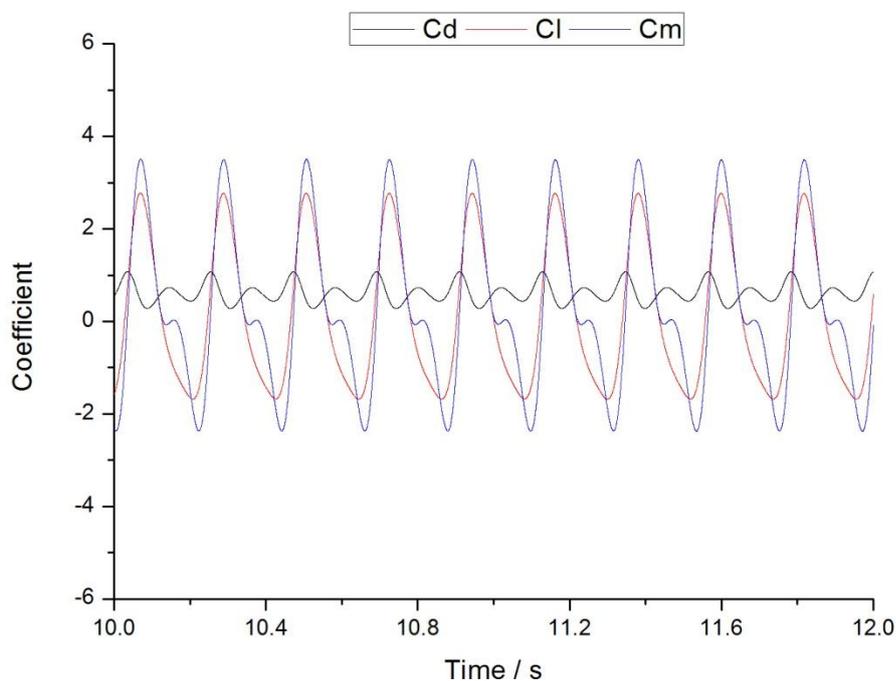


图4-50 受力系数时历曲线 (L18\_T1)

需要注意的是对于上述系列，为了更好地表达图片细节，纵坐标尺度并不一致，L12系列采用了纵坐标尺度-10至10的标量，L18系列采用了-6至6的标量，而其余系列采用了-8至8的标量。

观察上图4-26至图4-50，我们可以发现较之椭圆柱在均匀来流中的水动力表现，椭圆柱在前方圆柱结构的尾流区中水动力表现，其受力时历特性有了非常大的变化，观察到其频率  $f$ ，阻力系数  $C_d$ ，升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  特性变化如下：

1. 关于频率  $f$ ：

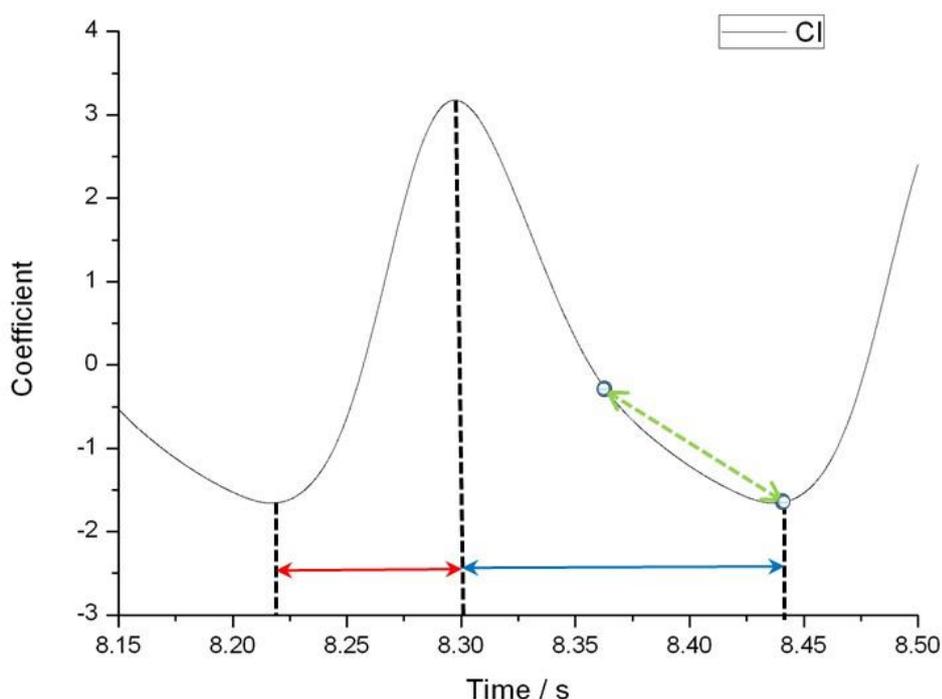
- a) 在上一章中提及的单个椭圆柱在均匀流中，其泄涡频率为8.06Hz，即升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  变化频率为8.06Hz，而阻力系数  $C_d$  变化频率为16.1Hz。各个力学分量变化可以看作是单一正弦形式。但是从这一章中的椭圆柱在前方圆柱结构的尾流区的水动力表现观察到，在椭圆柱与前方圆柱的中心在一直线，同时形心连线为来流方向，即圆柱在椭圆柱正前方（T0系列），升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$ ，阻力系数  $C_d$  虽然依旧存在周期性，但变化频率不再为8.06Hz，同时可以发现阻力系数  $C_d$  的时历曲线的形式依旧可以大致拟合为单一频率主导的正弦形式，但是从升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  的峰谷与峰值处的曲线变化形式可以看出，其已经不再是简单的正弦表现形式，但依旧是单一频率占主导。
- b) 随着椭圆柱与前方圆柱的两者形心连线与来流方向成一定夹角，即两者排列方式从串列排列变化为任意排列，从升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$ ，阻力系数  $C_d$  的时历曲线可以看出，三者依旧存在周期性，但是很明显的是三者不再是单一频率成分占主导，而分布包含了多个不同的频率成分。但从升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  的时历曲线可以看出，两结构物串列排列形式下占主导的单一频率依旧存在。
- c) 固定绕流的升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$ ，阻力系数  $C_d$  的频率变化规律主要反应的结构物在流场中泄涡规律或者与周围的漩涡相互左右的规律，故从上述特性中我们可以得知，由于前方圆柱的存在，即圆柱尾流场的存在，后方椭圆柱自身的泄涡规律发生了剧烈的变化。

2. 关于阻力系数  $C_d$ ：

- a) 与椭圆柱在均匀流中阻力系数  $C_d$  比较来说，其平均值依旧大于零，且各个工况下变化并不明显。
- b) 阻力系数  $C_d$  的脉动幅值相较于均匀流中 ( $C_{d2} = 0.00497$ ) 有了大幅度的增加，故有些工况下出现了有时阻力为负的情况，如 L6\_T0 工况。
- c) 对于非串列而任意排列的工况中，阻力系数  $C_d$  有明显多频率成分存在，但是各个频率所占成分有非常大的区别，故而表现在时历曲线图上有非常大的区别

3. 关于升力系数  $C_l$ ：

- a) 当两结构串列放置时，与椭圆柱在均匀流中升力系数  $C_l$  表现一致的是，此时其平均升力系数  $C_{l0} = 0$ ，即受到一个均值为零的振荡升力。
- b) 当两结构非串列放置时，此时其平均升力系数  $C_{l0}$  不等于0，且此力的方向指向两结构物互相远离的一侧，即其效果为使得椭圆柱受到排挤横向距离上持续远离前方圆柱物。
- c) 无论何种排列方式，脉动升力系数  $C_l$  的幅值，相较于椭圆柱在均匀流中的脉动升力系数  $C_{l1}$ ，有了非常巨大的放大，有的最大值的放大倍数近25倍。
- d) 无论何种排列方式，升力系数  $C_l$  的时历波形不再是简单的正弦形式，尤其是非串列排列式，其包含多频率成分。如图4-51中（L9\_T1为典型工况）其波形的主要形式为上升沿较陡峭（红色箭头标示区域），下降沿较缓和（蓝色箭头标示区域），且下降沿直至波谷处会包含一段变化相对更平坦的区域（绿色箭头标示区域）。



4-51 L9\_T1工况中升力系数  $C_l$  时历曲线

- e) 两结构物位置在发生纵向位置变化时，在横向距离位置两者较靠近（T0, T0.25系列工况）的情况下，可以发现圆柱的升力系数  $C_l$  的最大值随着纵向距离的增加在迅速减小；但是对于横向两者相对较远（T0.5, T0.75, T1系列工况）发现圆柱的升力系数  $C_l$  的最大值随着纵向距离的增加先增后减，即有中间转变距离。
  - f) 两结构物位置在发生横向位置变化时，在纵向距离两者较靠近（L6, TL9系列工况）的情况下，可以发现圆柱的升力系数  $C_l$  的最大值随着横向距离的增加在迅速减小；L12系列工况中，圆柱的升力系数  $C_l$  最大值随着横向距离亦在顺势递减，但是减小的幅度变缓；对于横向两者相对较远（L15, L18系列工况）发现圆柱的升力系数  $C_l$  其偏离其平均值的最大幅值随着横向距离的增加先增后减。
4. 关于扭矩系数  $C_m$ ：
- a) 当两结构串列放置时，与圆柱在均匀流中扭矩系数  $C_m$  表现一致的是，此时其平均扭矩系数  $C_{m0} = 0$ ，即受到一个均值为零的振荡扭矩。
  - b) 当两结构非串列放置时，此时其平均扭矩系数  $C_{m0}$  不等于0，且此力的方向指向逆时针方向，即其效果为使得圆柱发生持续转动，并使得其长轴更迅速地指向前方圆柱的中心（即转过一个更小的角度）。
  - c) 在圆柱在均匀流中，其脉动扭矩系数  $C_m$  的幅值基本保持为0，但是其在圆柱尾流场中，无论何种排列方式，其脉动扭矩系数  $C_m$  的幅值，有了非常惊人的放大，有的最大值的放大倍数百倍。
  - d) 无论何种排列方式，扭矩系数  $C_m$  的时历波形不再是简单的正弦形式，尤其是非串列排列式，其包含多频率成分。同时相较于升力系数  $C_l$ ，其波形种类更为丰富，有如升力系数  $C_l$  主要波形一样的上升沿较陡峭，下降沿较缓和，且下降

沿直至波谷处会包含一段变化相对更平坦的区域，如 L6\_T0.5 工况；波形在下降沿过程中存在波折区域，如 L18\_T0.75, L18\_T1 工况；波形在出现连续两个波谷，即在主波谷处存在曲线波动区域，如 L6\_T0.75 工况。

- e) 当两结构串列放置时，椭圆柱的升力系数  $C_l$  的最大值观察可得大于其扭矩系数  $C_m$  数值，但是其余任意排列工况中，扭矩系数  $C_m$  最大值都大于其升力系数  $C_l$ 。
- f) 就升力系数  $C_l$  与扭矩系数  $C_m$  的两者相位而言，观察可以发现，两者的相位基本一致，即当升力系数  $C_l$  达到幅值时扭矩系数  $C_m$  亦处于高位。细致比较发现，L6, L9 系列工况中扭矩系数  $C_m$  相位稍早置于升力系数  $C_l$ ，而 L15, L18 系列工况中扭矩系数  $C_m$  相位稍早置于升力系数  $C_l$ 。
- g) 两结构物位置在发生纵向位置变化时，在横向距离位置两者较靠近 (T0, T0.25, T0.5 系列工况) 的情况下，可以发现椭圆柱的扭矩系数  $C_m$  的最大值随着纵向距离的增加在迅速减小；但是对于横向两者相对较远 (T0.75, T1 系列工况) 发现椭圆柱的扭矩系数  $C_m$  的最大值随着纵向距离的增加先增后减，即有中间转变距离。
- h) 两结构物位置在发生横向位置变化时，所有工况都存在着椭圆柱的扭矩系数  $C_m$  的最大值随着横向距离的增加先增后减的现象。

#### 4.2.1.2 后方椭圆柱受力频域特性

上一小节对于椭圆柱的水动力分析已经发现升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$ ，阻力系数  $C_d$  都包含了多频率成分。所以为了跟好地认识椭圆柱在前方结构物的尾流场中的水动力的特性，有必要在频域的角度来看待这个问题，下面将就纵向变化，与横向变化分类，给出前方圆柱沿纵/横向位置变化，后方椭圆柱阻力系数  $C_d$ ，升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  的各自频域分布。如下图4-51至图4-65为各个系数当前方圆柱位置沿纵向变化时频域分布，图4-52至图4-81为各个系数当前方圆柱位置沿横向变化时频域分布。

##### 1. 纵向变化

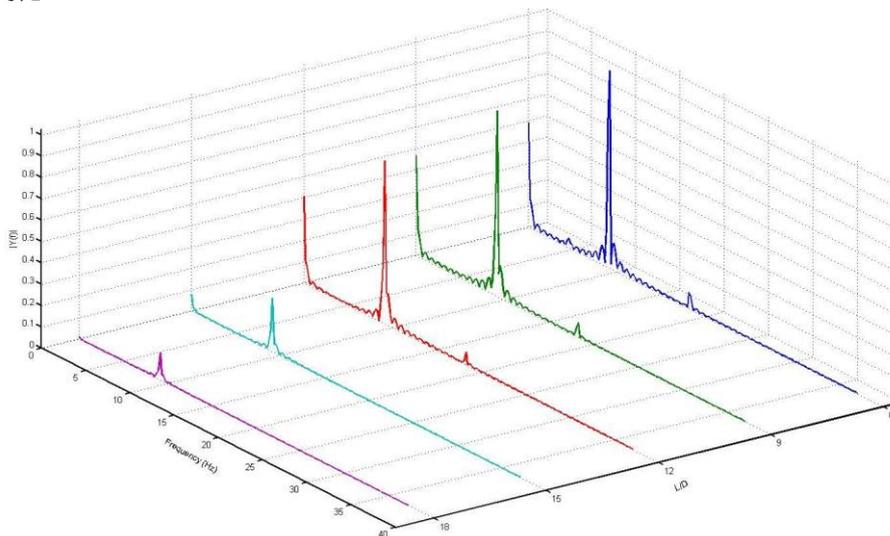


图4-52 纵向变化阻力系数  $C_d$  (T0)

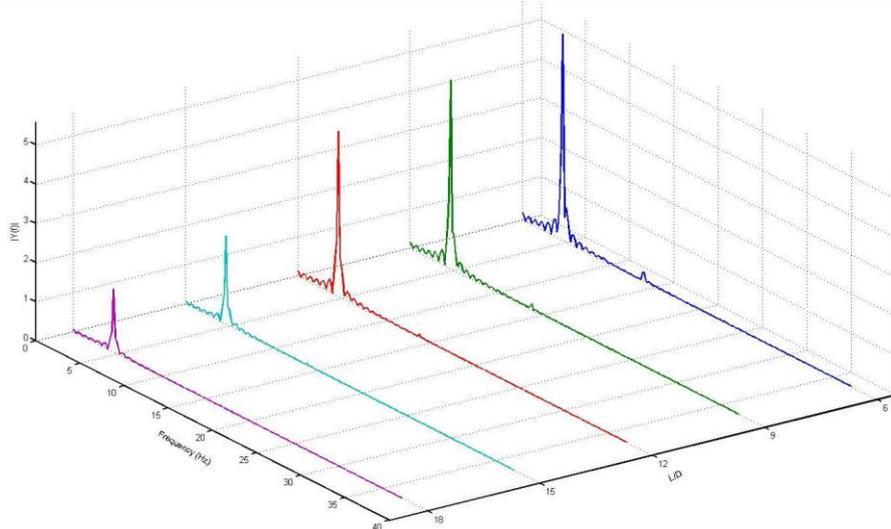


图4-53 纵向变化升力系数 $C_l$  (T0)

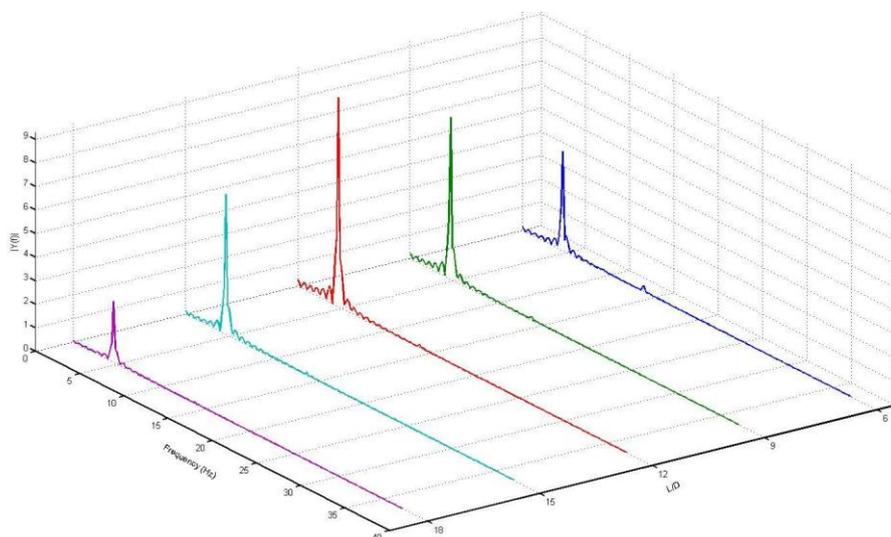


图4-54 纵向变化扭矩系数 $C_m$  (T0)

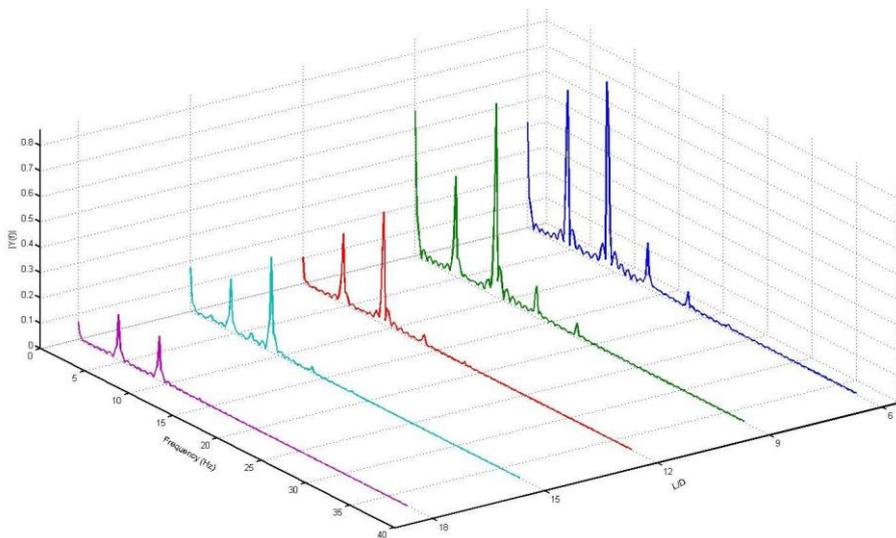


图4-55 纵向变化阻力系数 $C_d$  (T0.25)

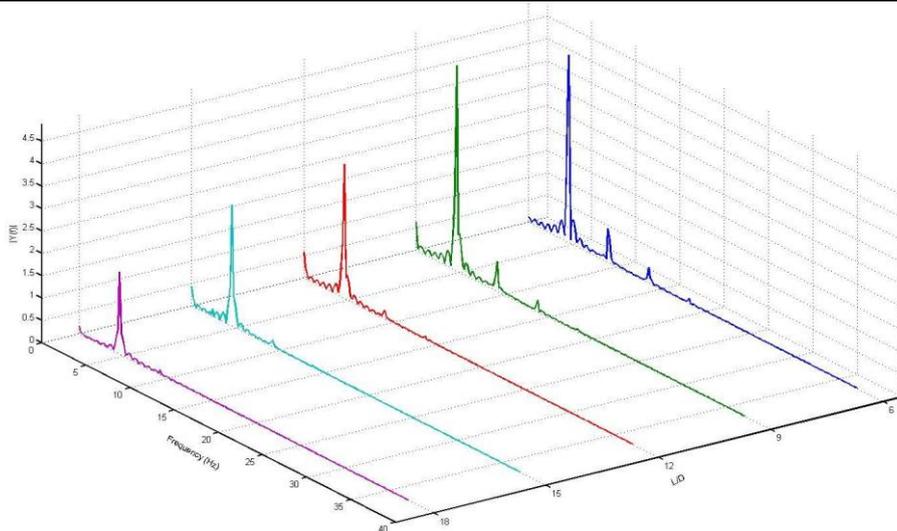


图4-56 纵向变化升力系数 $C_l$  (T0.25)

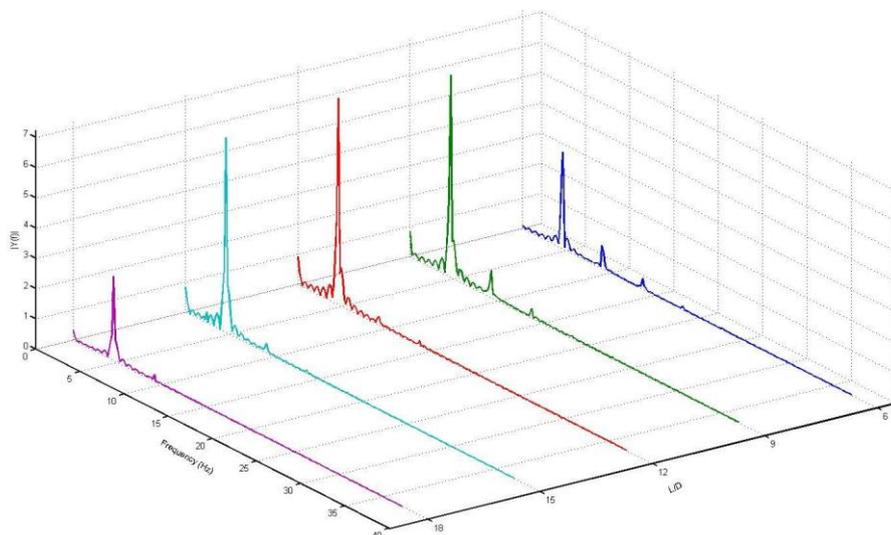


图4-57 纵向变化扭矩系数 $C_m$  (T0.25)

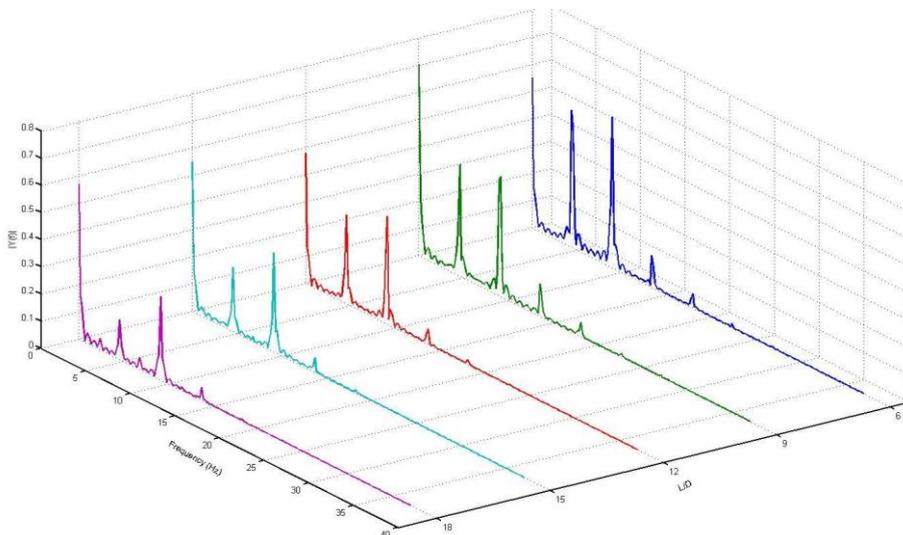


图4-58 纵向变化阻力系数 $C_d$  (T0.5)

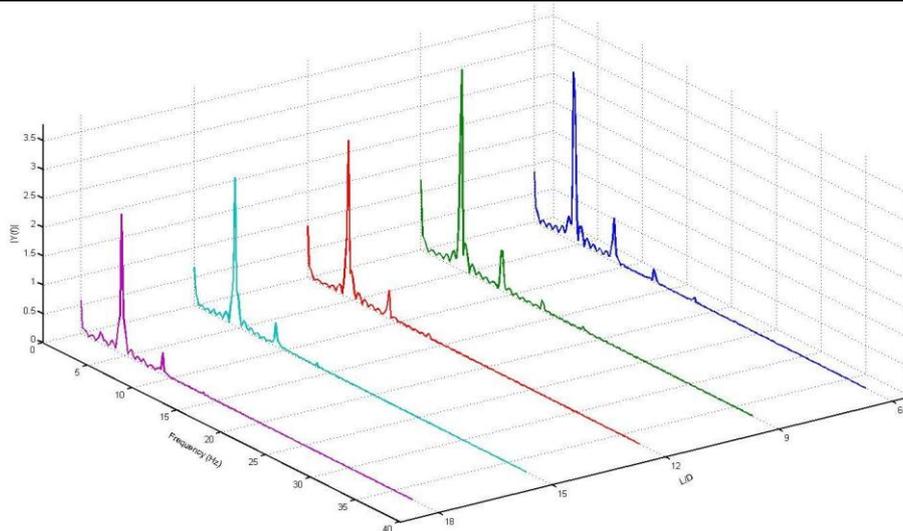


图4-59 纵向变化升力系数 $C_l$  (T0.5)

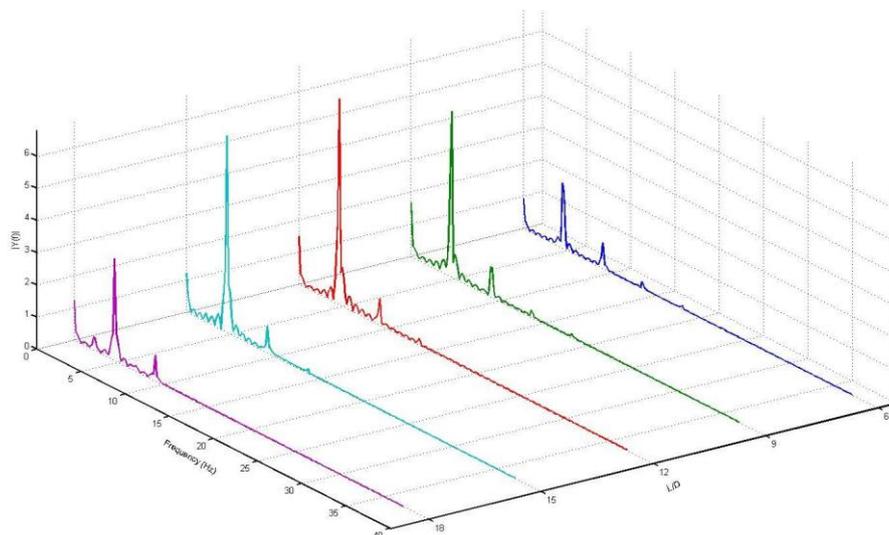


图4-60 纵向变化扭矩系数 $C_m$  (T0.5)

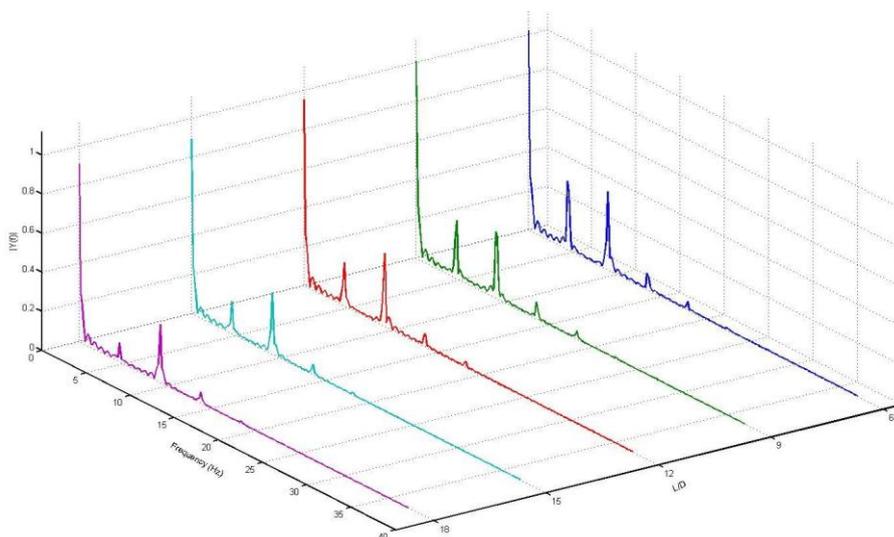


图4-61 纵向变化阻力系数 $C_d$  (T0.75)

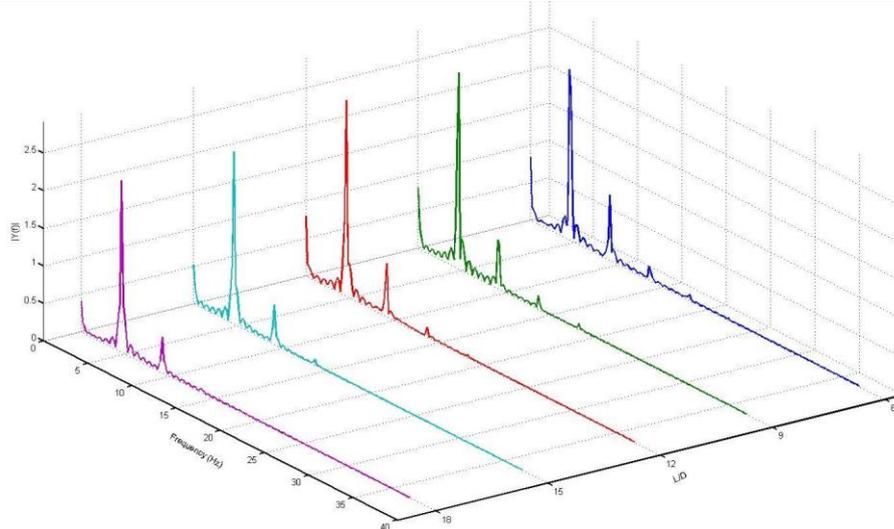


图4-62 纵向变化升力系数 $C_l$  (T0.75)

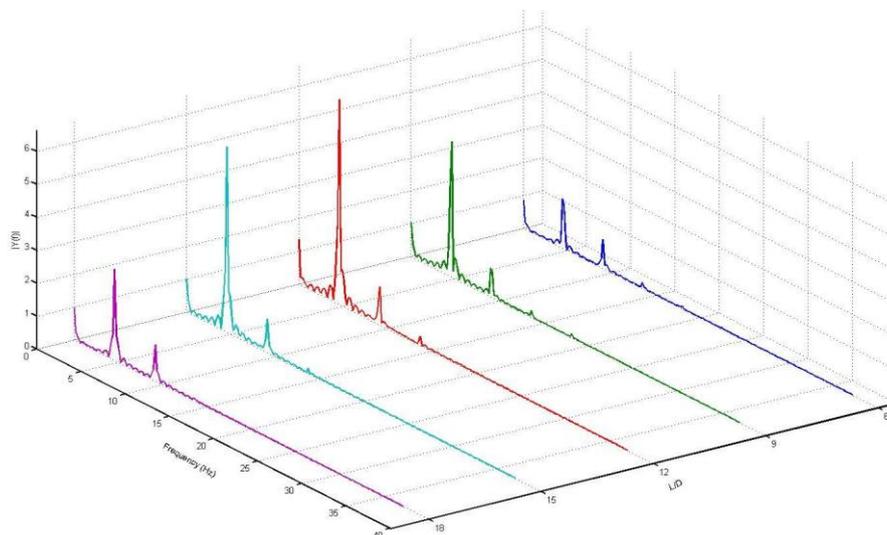


图4-63 纵向变化扭矩系数 $C_m$  (T0.75)

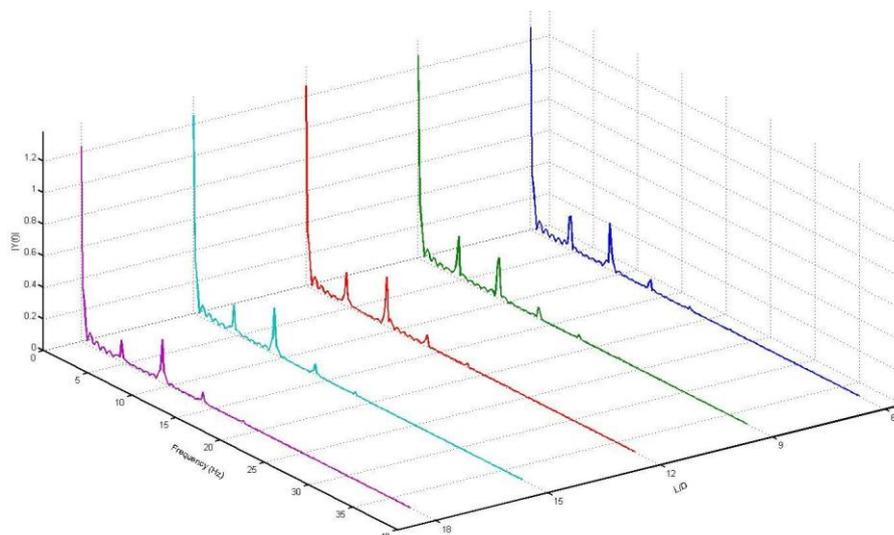


图4-64 纵向变化阻力系数 $C_d$  (T1)

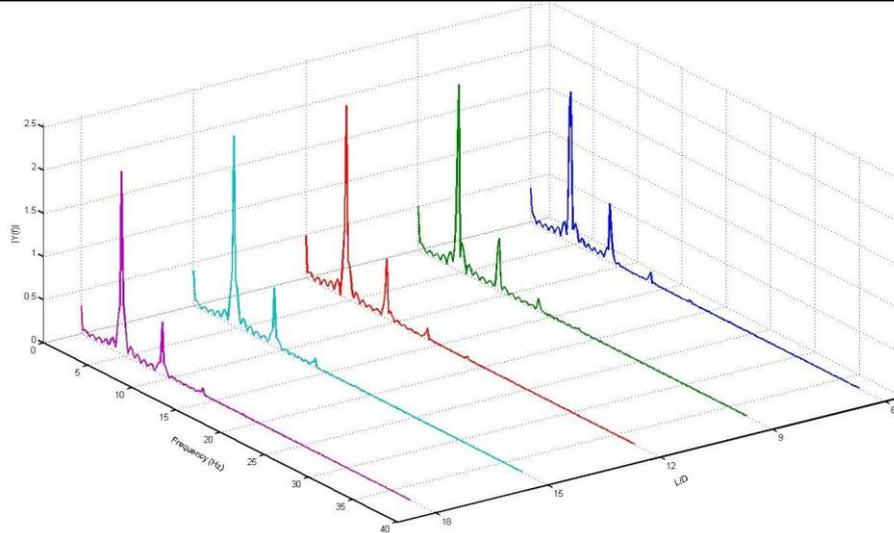


图4-65 纵向变化升力系数 $C_l$  (T1)

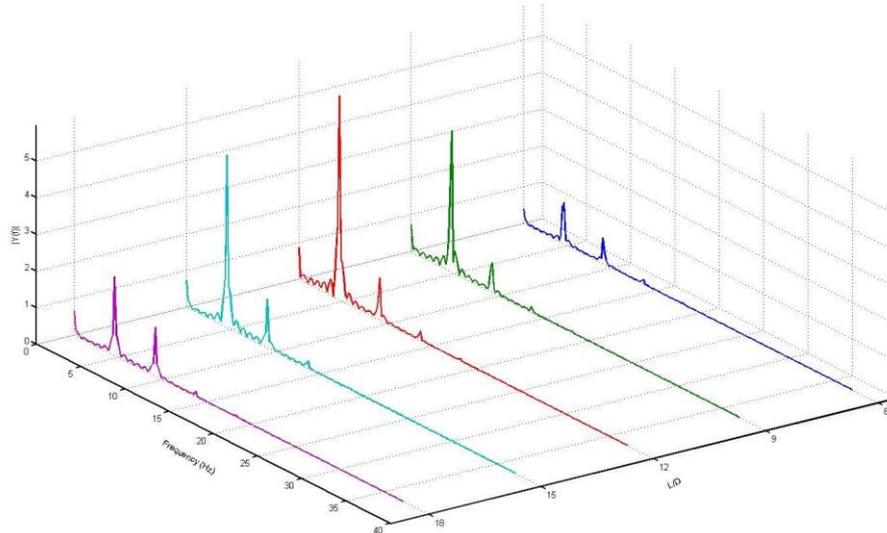


图4-66 纵向变化扭矩系数 $C_m$  (T1)

2. 横向变化

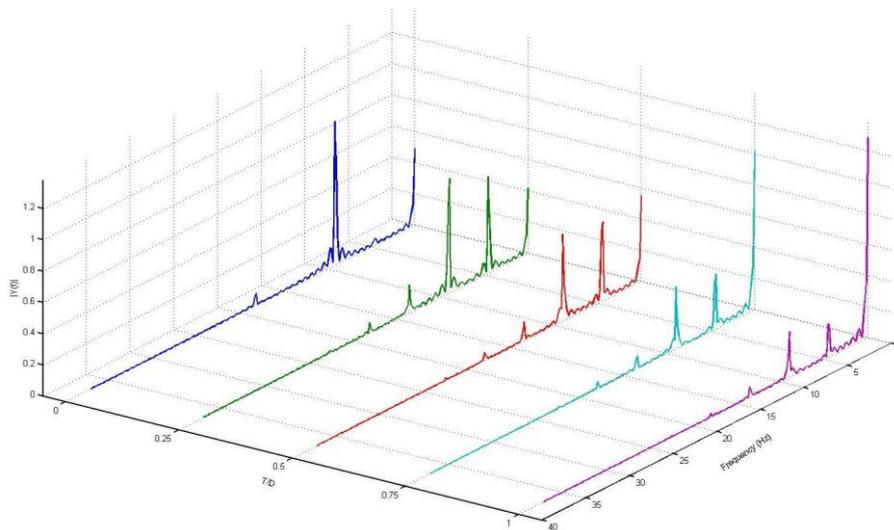


图4-67 横向变化阻力系数 $C_d$  (L6)

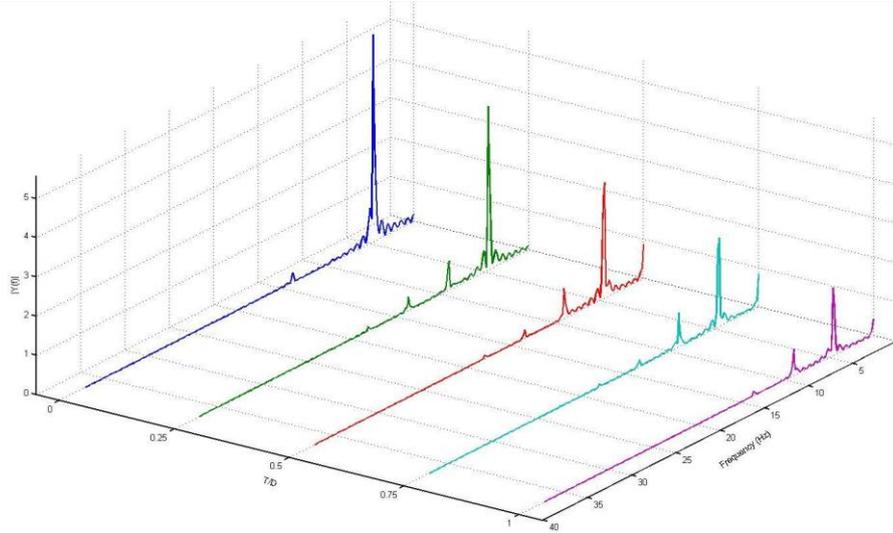


图4-68 横向变化升力系数 $C_l$  (L6)

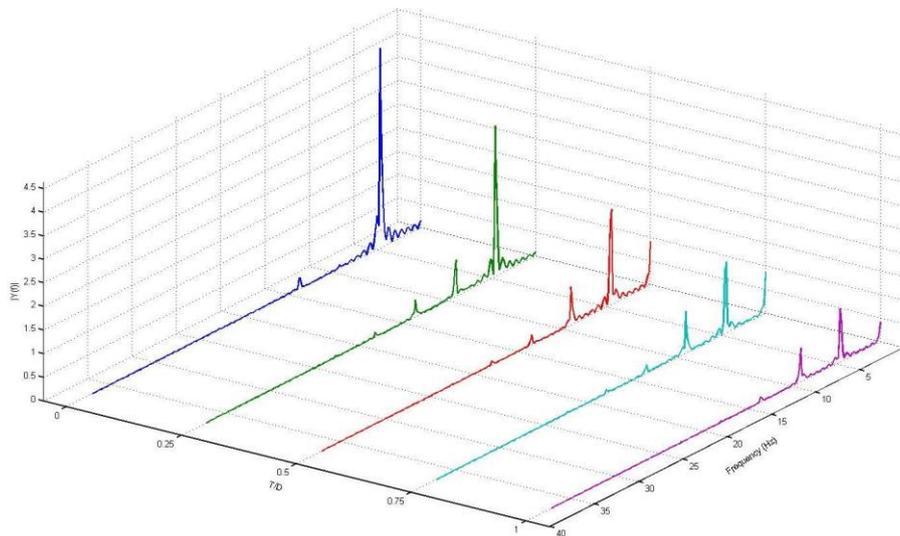


图4-69 横向变化扭矩系数 $C_m$  (L6)

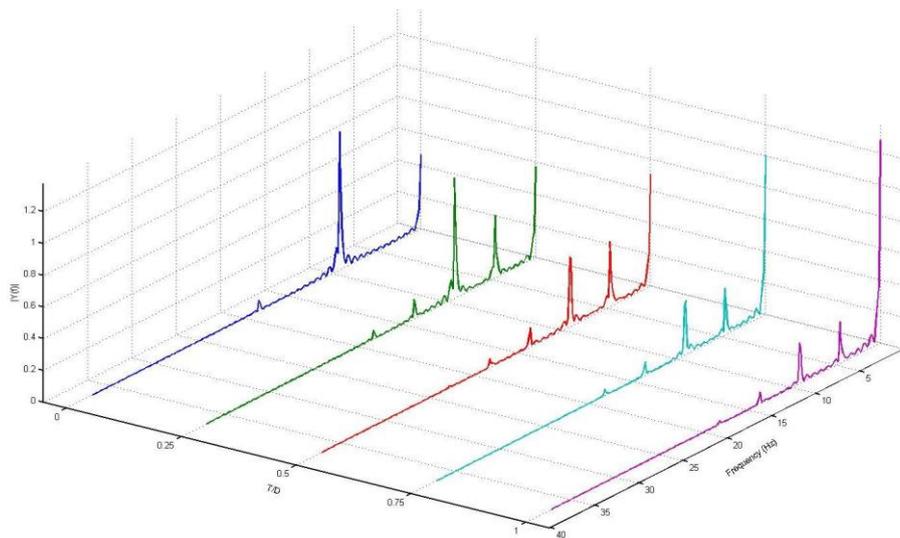


图4-70 横向变化阻力系数 $C_d$  (L9)

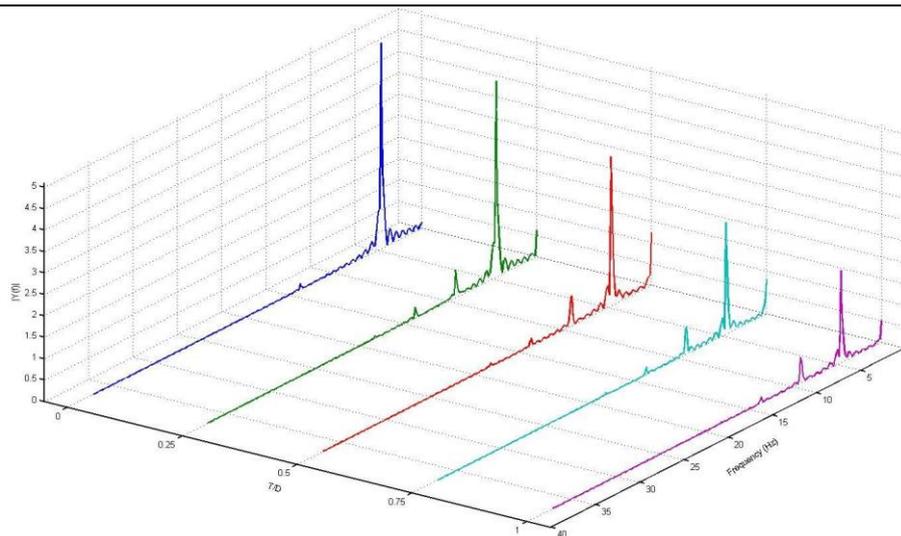


图4-71 横向变化升力系数 $C_l$  (L9)

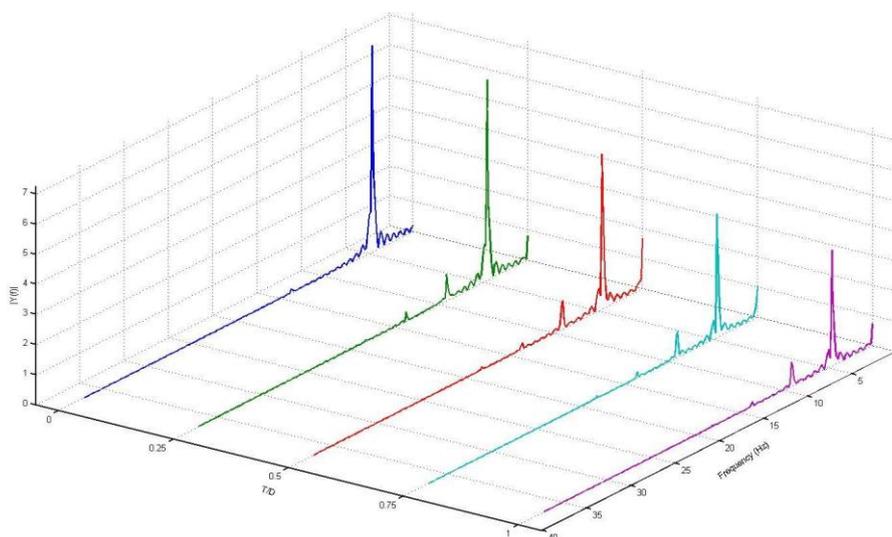


图4-72 横向变化扭矩系数 $C_m$  (L9)

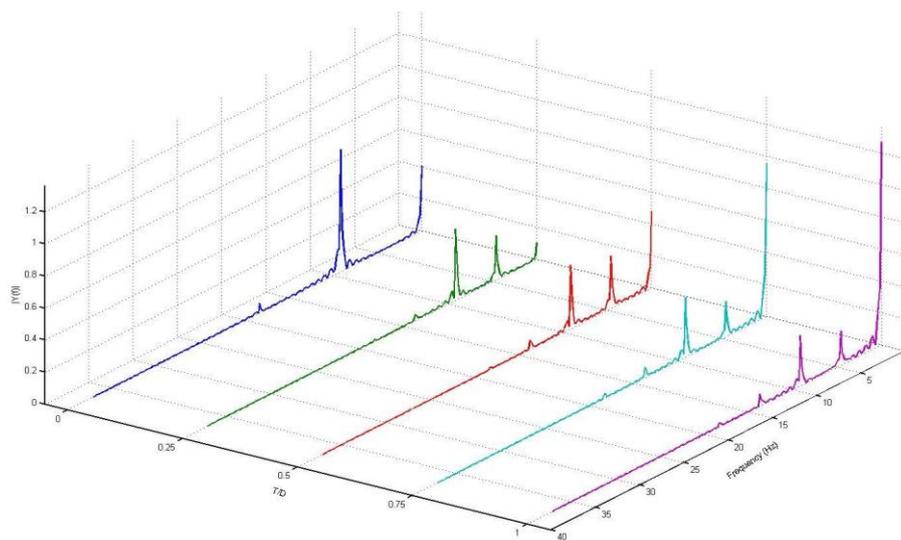


图4-73 横向变化阻力系数 $C_d$  (L12)

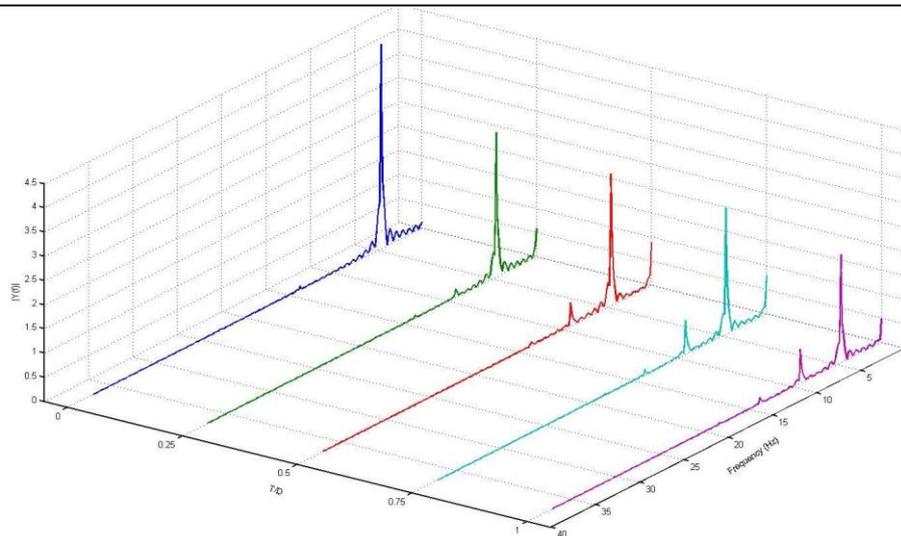


图4-74 横向变化升力系数 $C_l$  (L12)

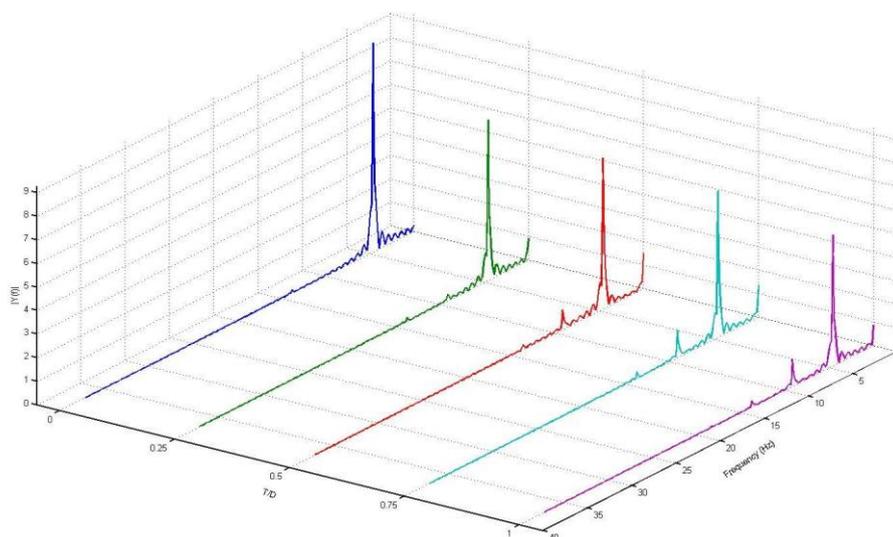


图4-75 横向变化扭矩系数 $C_m$  (L12)

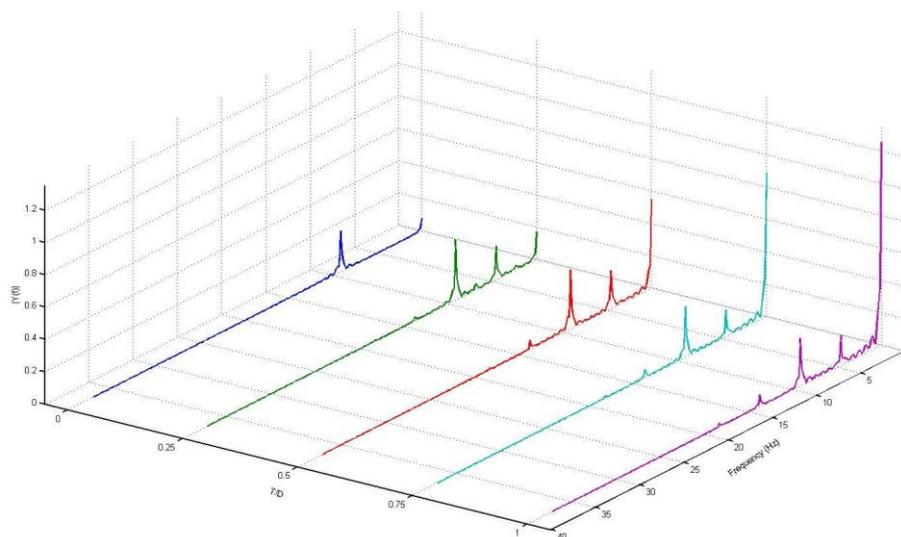


图4-76 横向变化阻力系数 $C_d$  (L15)

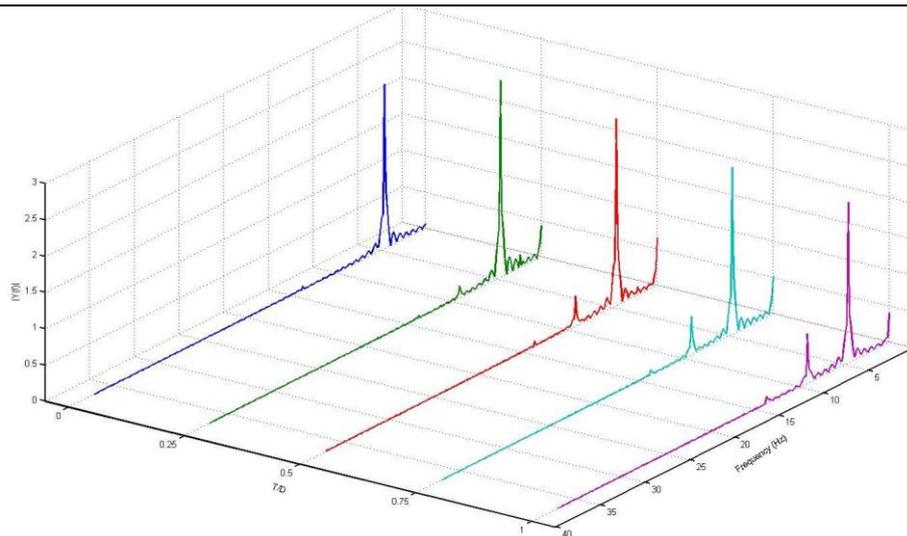


图4-77 横向变化升力系数 $C_l$  (L15)

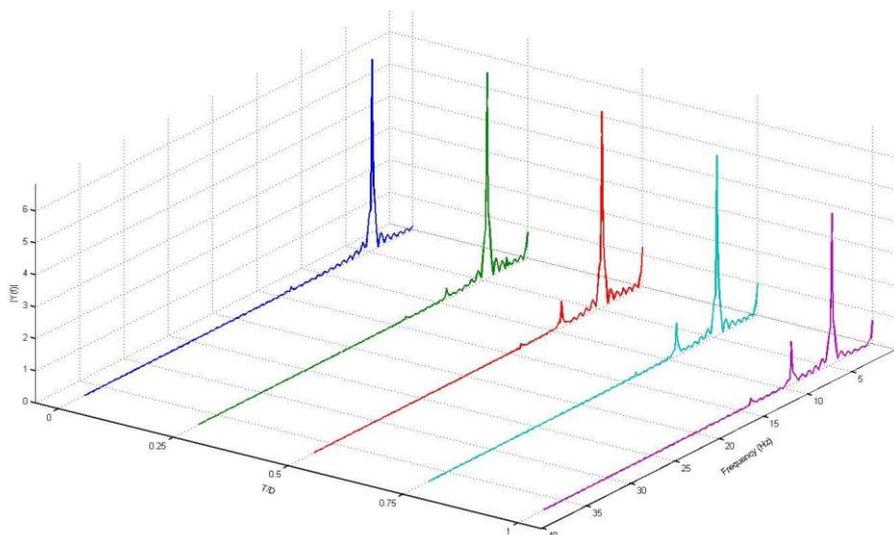


图4-78 横向变化扭矩系数 $C_m$  (L15)

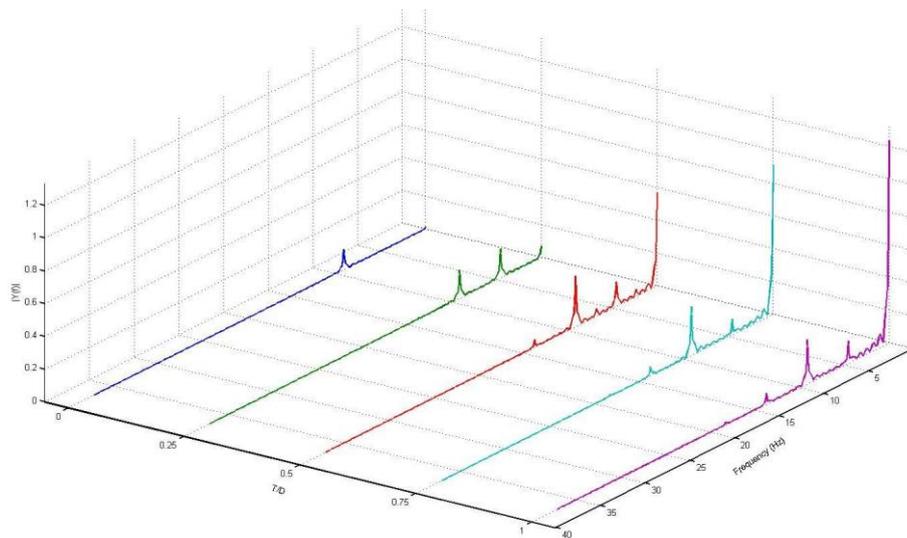


图4-79 横向变化阻力系数 $C_d$  (L18)

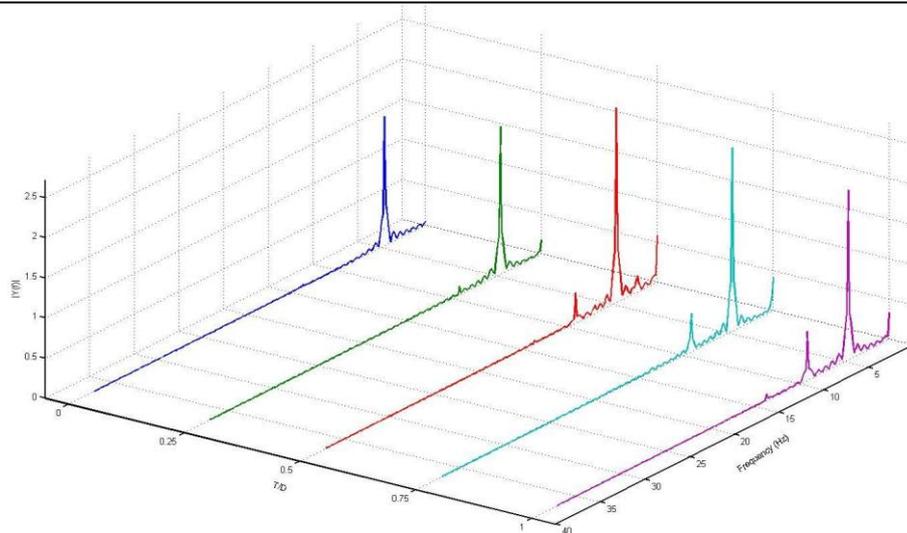


图4-80 横向变化升力系数 $C_l$  (L18)

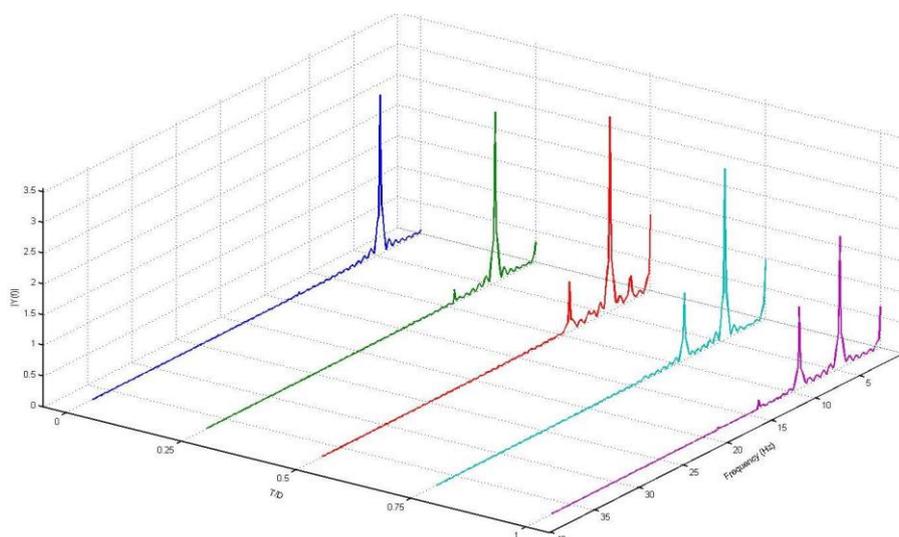


图4-81 横向变化扭矩系数 $C_m$  (L18)

从上面的频域分析的系列图中我们可以得到如下规律：

1. 当前方圆柱在椭圆柱正前方时，椭圆柱的响应中存在一个完全主导的频率：阻力系数 $C_d$ 存在一个主要频率为9.2Hz，升力系数 $C_l$ ，扭矩系数 $C_m$ 存在一个主要频率为4.6Hz。同时对比椭圆柱在均匀流中的响应，发现尽管其亦为单一频率响应，但是数值发生了巨大的变化，现在所得的频率值为前方圆柱水动力响应数值，即升力系数 $C_l$ ，扭矩系数 $C_m$ 的变化频率等于前方圆柱漩涡频率，而阻力系数 $C_d$ 的变化频率为前方圆柱漩涡频率的二倍频。可得出结论，在此情况下后方椭圆柱的水动力响应完全被前方尾流区中的漩涡所主导。
2. 当前方圆柱在椭圆柱侧前方时，椭圆柱的响应中并不只存在单一频率，而是同时存在多个频率成分。如 T0.25系列中：阻力系数 $C_d$ 存在三个主要频率，分别为4.6Hz，9.2Hz与13.6Hz。三者有着比较一致变化趋势，即都随着纵向距离的增加，幅值相应减小，且在无因次距离为15时经历巨幅下降。同时在四倍频18.3Hz处有一个非常不明显的频率成分存在；升力系数 $C_l$ 存在两个主要频率为分别为4.6Hz与9.2Hz。随着纵向距离的增加，两者幅值都相应减小，不过对于4.6Hz成分，其在纵向无因次距离6与纵向无因次距离9两工况中得到了相近的幅值；扭矩系数 $C_m$ 存在两个主要频

率为分别为4.6Hz与9.2Hz。随着纵向距离的增加，4.6Hz成分幅值先增后减，而9.2Hz成分幅值则相应减小。

3. 观察可知，椭圆柱的水动力响应会随着与前方圆柱的横向与纵向位置变化出现非单一频率成分，同时各频率成分的幅值或者权重各不相同，并随着位置的变化存在一定规律。

#### 4.2.1.3 后方椭圆柱各频率下力系数成分

很显然通过上一小节“后方椭圆柱受力频域特性”的分析之后，我们可以看到后方椭圆柱由于前方圆柱结构的存在，其阻力系数 $C_d$ ，升力系数 $C_l$ ，扭矩系数 $C_m$ 等都不再是其在均匀流中的表现，即只存在单一频率成分，而各包含了多频率成分，而我们发现各频率成分的幅值随着位置的变化存在一定规律。而当使用上一小节中的图示方法并不能有效地囊括进所有的计算工况中的结果，只能单一的遵从纵向或者横向变化的规律，同时也不能完整突出某一频率成分对应系数的变化，这并不利于后续的分析，所以有必要使用一种方法有效地提取出与各个频率成分相合的分力系数幅值。以下简要介绍一下本节使用的分析后方椭圆柱受历时信息的方法。

本文中，我们认为钝体结构上水动力可分解为三个成分——阻力 $F_d$ ，升力 $F_l$ ，扭矩 $F_m$ 可以表达成如下的形式：

$$F = F_0 + \sum_{i=1}^n F_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (3-1)$$

式中 $F_0$ 是平均力， $F_i$ 和 $\theta_i$ 分别为频率 $f_i$ 脉动力的幅值与相位角。

同时在第二章中已经提及了对于受力的无因次化得到的系数，故系数可同式3-1一样，得到如下表达式：

$$C = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (3-2)$$

式中 $C_0$ 是平均力系数， $C_i$ 为频率 $f_i$ 脉动力系数的幅值。

一般来说一个任意波形 $x(t)$ 可以表达成如下傅里叶级数形式：

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (3-3)$$

式中 $a_0$ ， $a_n$ ， $b_n$ 分布为：

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) dt \quad (3-4)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} x(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (3-5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} x(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (3-6)$$

式中 $n$ 即表示以上系数为 $n f_0$ 上计算得到的分量。

故对于各系数幅值来说，有如下表达式：

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3-7)$$

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (3-8)$$

通过使用上述算法，可得以下分力系数：

1. 平均阻力系数  $C_{d0}$ ，如下图4-81所示：

表4-2 平均阻力系数  $C_{d0}$  结果汇总

$C_{d0}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.2463	0.2129	0.2614	0.5096	0.6428
9	0.2337	0.2917	0.3310	0.5018	0.6413
12	0.2011	0.0495	0.2378	0.4808	0.6369
15	0.0381	0.0805	0.2718	0.4403	0.6260
18	0.0051	0.0369	0.2874	0.4552	0.6180

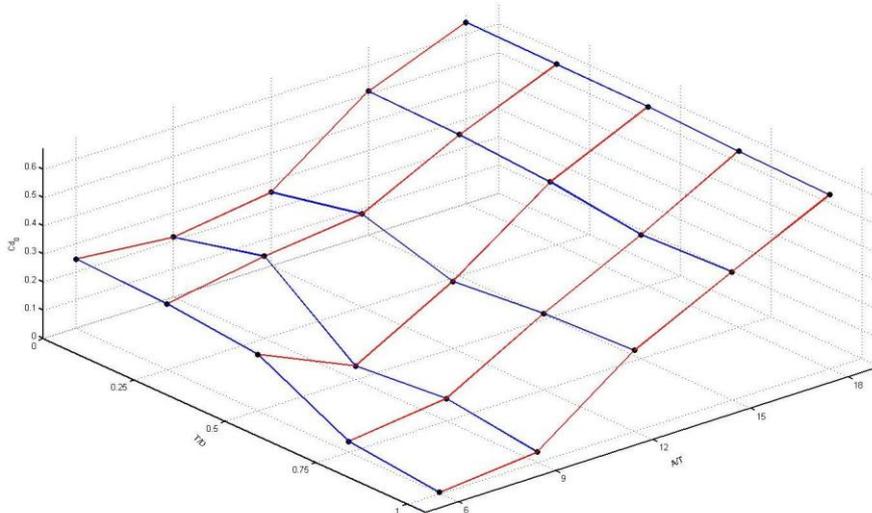


图4-81 平均阻力系数  $C_{d0}$

2.  $f_1 = 4.6\text{Hz}$  主导的一阶脉动阻力系数  $C_{d1}$ ，如下图4-82所示：

表4-3 一阶脉动阻力系数  $C_{d1}$  结果汇总

$C_{d1}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0000	0.5955	0.5712	0.4013	0.2645
9	0.0000	0.3025	0.3301	0.2689	0.2242
12	0.0000	0.2159	0.2631	0.1810	0.1717
15	0.0000	0.1517	0.1772	0.1116	0.1392
18	0.0000	0.1302	0.1206	0.0726	0.0949

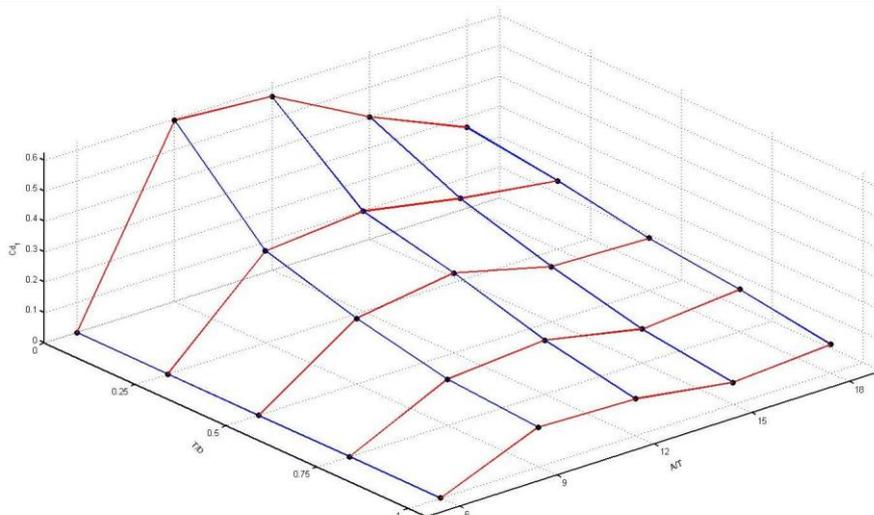


图4-82 一阶脉动阻力系数  $C_{d1}$

3.  $f_2 = 9.2\text{Hz}$  主导的二阶脉动阻力系数  $C_{d2}$ ，如下图4-83所示：

表4-4 二阶脉动阻力系数  $C_{d2}$  结果汇总

$C_{d2}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	1.0080	0.7264	0.4518	0.2901	0.2346
9	0.8917	0.7808	0.4944	0.3932	0.2988
12	0.7684	0.4645	0.4196	0.3893	0.3099
15	0.2559	0.3822	0.3689	0.3290	0.2984
18	0.1254	0.1302	0.3058	0.2997	0.2683

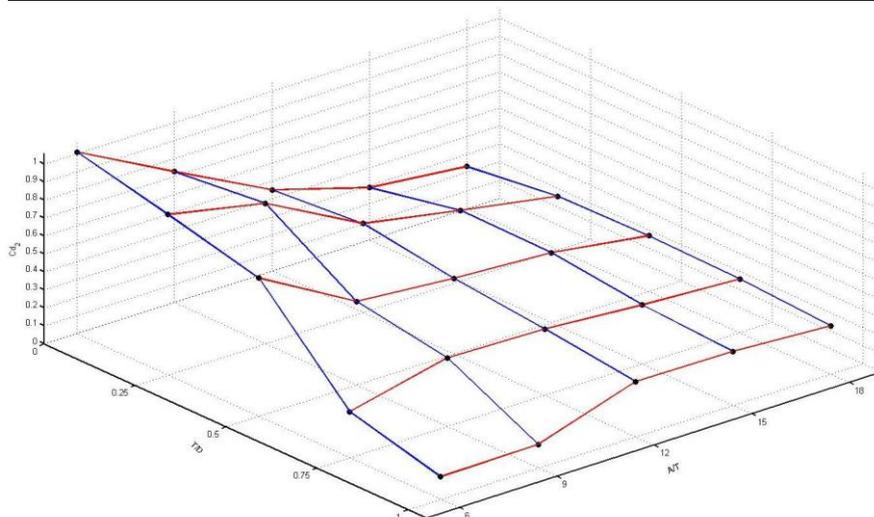


图4-83 二阶脉动阻力系数  $C_{d2}$

4.  $f_3 = 13.6\text{Hz}$  主导的三阶脉动阻力系数  $C_{d3}$ ，如下图4-84所示：

表4-5 三阶脉动阻力系数  $C_{d3}$  结果汇总

$C_{d3}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0000	0.1812	0.1127	0.0875	0.0725

9	0.0000	0.1327	0.1019	0.0937	0.0703
12	0.0000	0.0306	0.0553	0.0877	0.0591
15	0.0000	0.0223	0.0475	0.0547	0.0682
18	0.0000	0.0000	0.0346	0.0583	0.0479

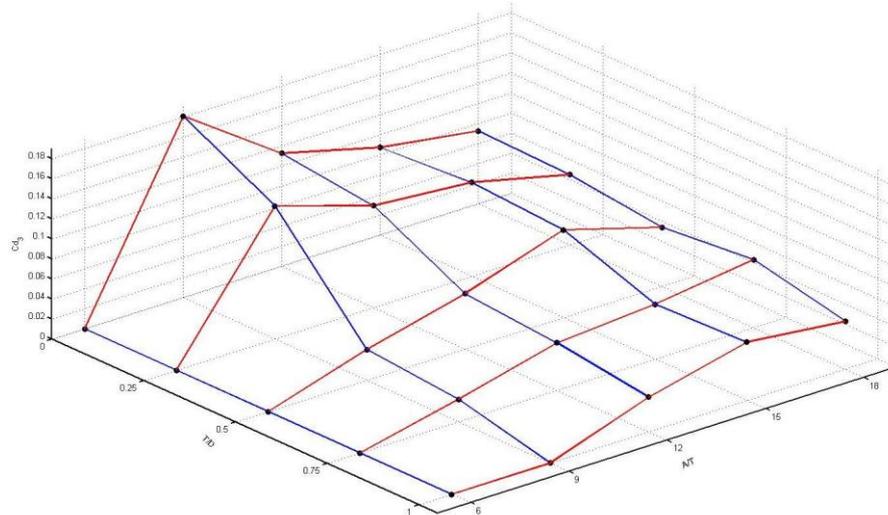


图4-84 三阶脉动阻力系数  $C_{d3}$

5.  $f_4 = 18.3\text{Hz}$  主导的四阶脉动阻力系数  $C_{d4}$ ，如下图4-85所示：

表4-6 阶脉动阻力系数  $C_{d4}$  结果汇总

$C_{d4}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0934	0.0523	0.0692	0.0442	0.0218
9	0.0820	0.0608	0.0410	0.0376	0.0326
12	0.0586	0.0181	0.0209	0.0354	0.0301
15	0.0000	0.0000	0.0475	0.0236	0.0259
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0583	0.0164

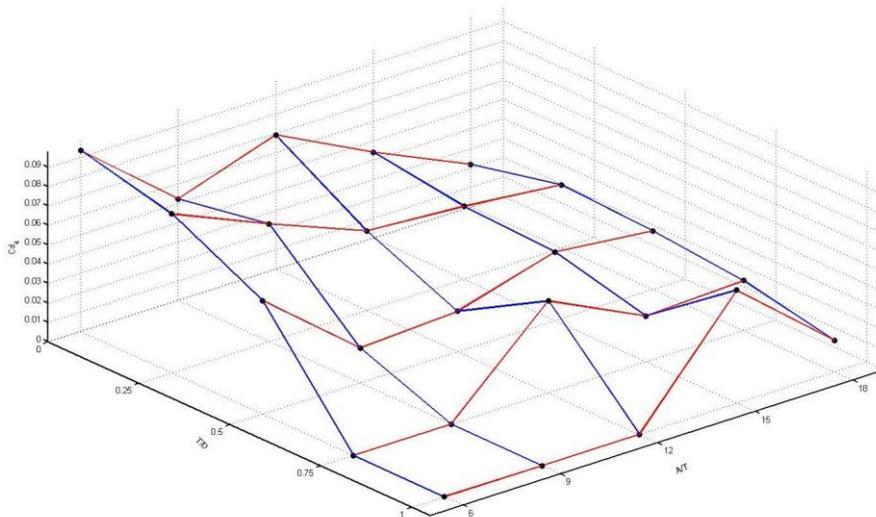


图4-85 四阶脉动阻力系数  $C_{d4}$

6. 平均升力系数  $C_{l0}$ ，如下图4-86所示：

表4-7 均升力系数  $C_{l0}$  结果汇总

$C_{l0}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0110	0.0072	0.4529	0.3949	0.2089
9	0.0001	0.2498	0.5737	0.4227	0.2285
12	0.0001	0.3308	0.4379	0.3710	0.2114
15	0.0012	0.2482	0.3571	0.2917	0.1834
18	0.0016	0.0827	0.2631	0.2178	0.1412

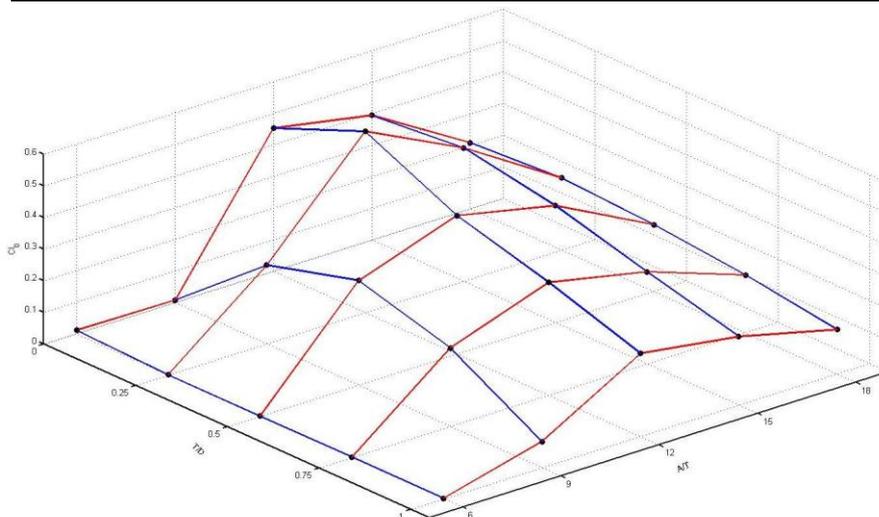


图4-86 平均升力系数  $C_{l0}$

7.  $f_1 = 4.6\text{Hz}$  主导的一阶脉动升力系数  $C_{l1}$ ，如下图4-87所示：

表4-8 一阶脉动升力系数  $C_{l1}$  结果汇总

$C_{l1}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	5.3258	4.2188	2.9835	2.2491	1.8029
9	4.8300	4.5947	3.4977	2.6572	2.1448
12	4.2398	3.0314	2.7268	2.6054	2.2303
15	2.2688	2.7468	2.5852	2.3250	2.1924
18	1.6166	1.8307	2.4083	2.2860	2.1053

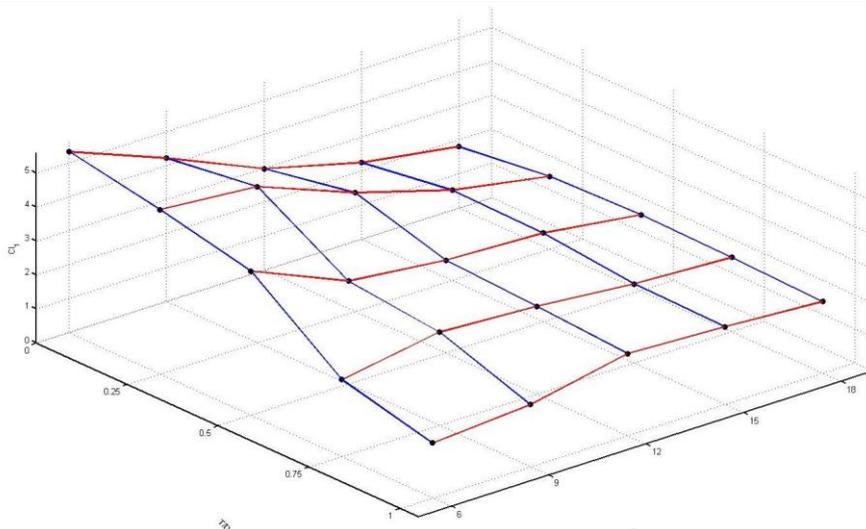


图4-87 一阶脉动升力系数  $C_{l1}$

8.  $f_2 = 9.2\text{Hz}$  主导的二阶脉动升力系数  $C_{l2}$ ，如下图4-88所示：

表4-9 二阶脉动升力系数  $C_{l2}$  结果汇总

$C_{l2}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0000	0.6926	0.8387	0.8439	0.6780
9	0.0000	0.6860	0.7170	0.7033	0.6244
12	0.0000	0.2368	0.4884	0.7277	0.7003
15	0.0000	0.1921	0.4293	0.5700	0.6596
18	0.0000	0.0000	0.3407	0.5150	0.5785

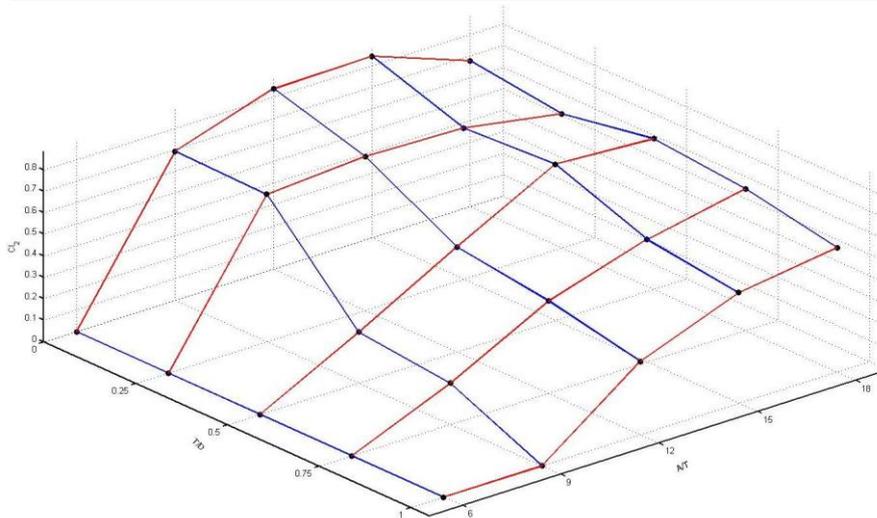


图4-88 二阶脉动升力系数  $C_{l2}$

9. 平均扭矩系数  $C_{m0}$ ，如下图4-89所示：

表4-10 平均扭矩系数  $C_{m0}$  结果汇总

$C_{m0}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0112	0.0146	0.4685	0.4084	0.2168

9	0.0002	0.3302	0.7670	0.5656	0.3060
12	0.0001	0.5453	0.7192	0.6085	0.3471
15	0.0026	0.4859	0.6957	0.5668	0.3564
18	0.0042	0.1873	0.5934	0.4889	0.3170

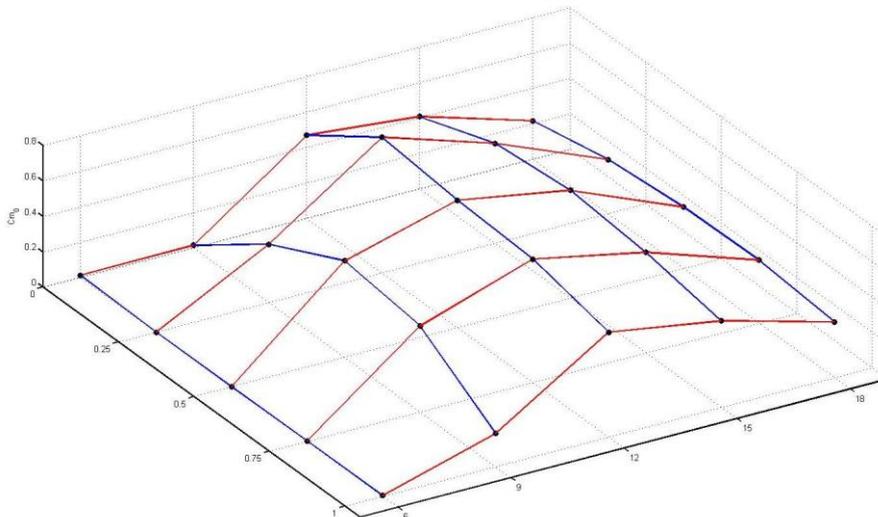


图4-89 平均扭矩系数  $C_{m0}$

10.  $f_1 = 4.6\text{Hz}$  主导的一阶脉动扭矩系数  $C_{m1}$ ，如下图4-90所示：

表4-11 一阶脉动扭矩系数  $C_{m1}$  结果汇总

$C_{m1}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	4.2725	3.2228	2.0545	1.4852	1.1783
9	6.8923	6.6683	5.1598	4.1814	3.8495
12	8.9261	6.8783	6.3894	6.2339	5.5772
15	5.9606	6.4977	6.1558	5.6685	4.6699
18	2.5948	2.7753	3.1202	2.7930	2.1225

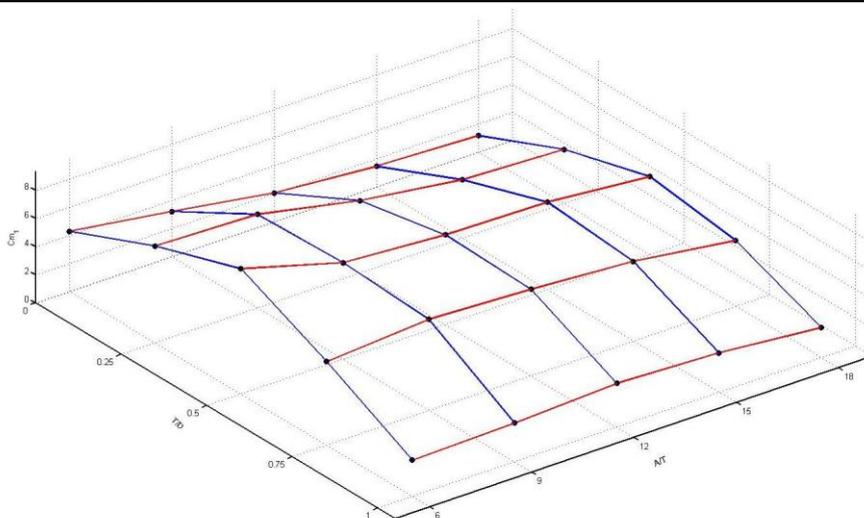


图4-90 一阶脉动升力系数  $C_{m1}$

11.  $f_2 = 9.2\text{Hz}$  主导的二阶脉动升力系数  $C_{m2}$ ，如下图4-91所示：

表4-12 二阶脉动升力系数  $C_{m2}$  结果汇总

$C_{m2}$	0	0.25	0.50	0.75	1
6	0.0000	0.7237	0.8616	0.8707	0.7101
9	0.0000	0.9381	0.9851	0.9579	0.8575
12	0.0000	0.4104	0.8209	1.2123	1.1623
15	0.0000	0.3596	0.8220	1.0930	1.2767
18	0.0000	0.0000	0.7599	1.1504	1.2993

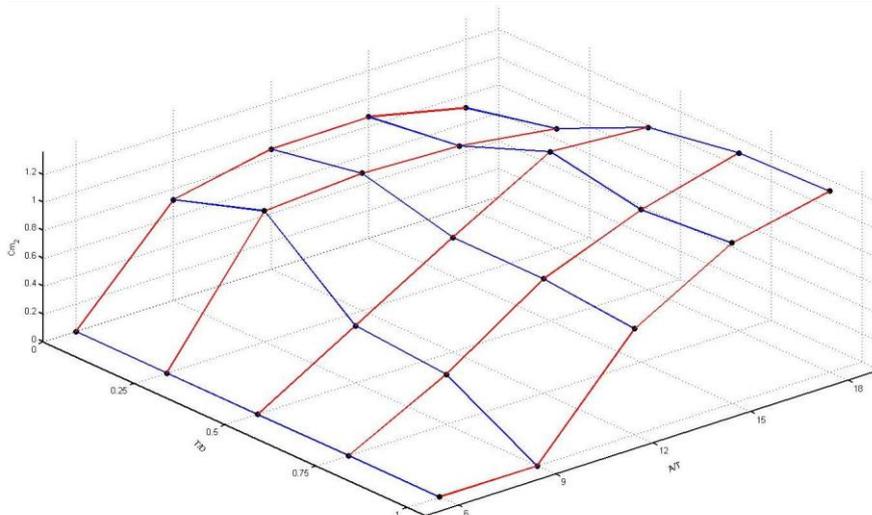


图4-91 二阶脉动升力系数  $C_{m2}$

#### 4.2.1.4 后方椭圆柱各频率下力系数成分云图分析

上一小节“后方椭圆柱各频率下力系数成分”之中，我们使用傅里叶级数的算法成功提取了后方椭圆柱水动力响应中各频率主导下的幅值成分，并将之绘制成椭圆柱相对前方圆柱横向位置与纵向位置变化的网状图，但是观察上述网状图，我们发现如下两大缺点：

1. 通过以上简单的网状图，非常难找到整个平面上，即横向位置与纵向位置同时变化时的数据变化规律。
2. 由于数值计算的工况数毕竟有限，整个网状图的分布非常松散，这对于给出其响应规律分布非常困难，即非常难通过后方椭圆柱的响应给出流场规律，进而推得前方圆柱位置情况。

故本节中，我们需要对以上得到的数据以及网状图做出一定的改进，进而依此进行下一步的分析。本节中，我们借助已经得到的数据点，使用数值差分的方式得到更细致的数据分布，以彩色的云图形式给出，同时对各色区交界线进行拟合光滑，得到下图 4-92 至图 4-101：

1. 平均阻力系数  $C_{d0}$ ，如下图4-92所示：

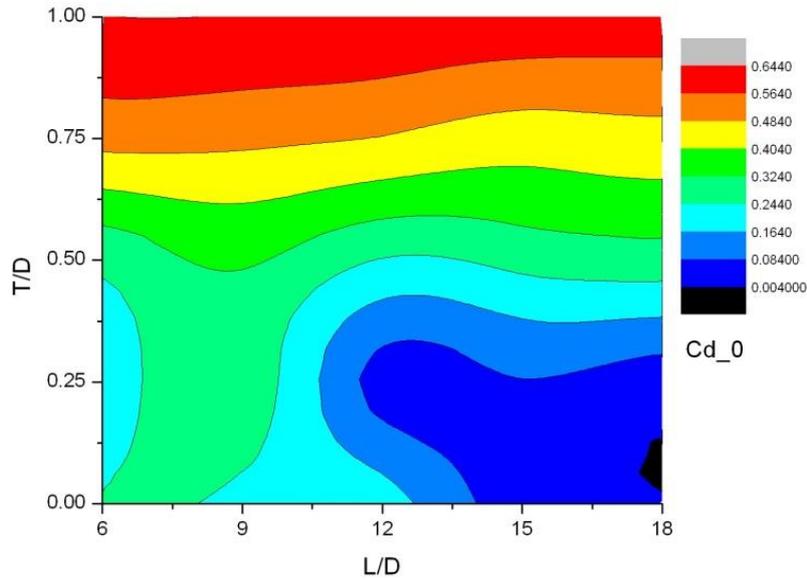


图4-92 平均阻力系数云图  $C_{d0}$

从上图我们可以得到关于平均阻力系数 $C_{d0}$ 的规律：其主要可以用来通过梯度的变化判断相对前方圆柱横向位置的变化。同时发现横向距离为零，纵向距离较远时，其值迅速趋向于零，而当存在一定的相对横向距离时，其值随着纵向距离的变化不大。

2.  $f_1 = 4.6\text{Hz}$  主导的一阶脉动阻力系数  $C_{d1}$ ，如下图4-93所示：

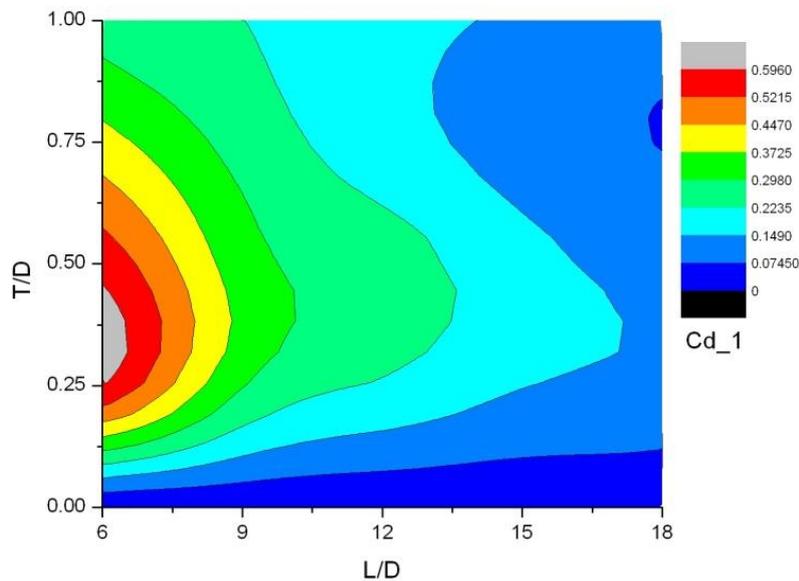


图4-93 一阶脉动阻力系数云图  $C_{d1}$

从上图我们可以看出关于一阶脉动阻力系数 $C_{d1}$ ：其有一个明显的峰值点击处于纵向无因次距离 6，横向无因次距离 0.4，同时远离这个点时，其值依此减小，即所有梯度方向均指向这个点，可利用此来进行相对前方圆柱的横向与纵向位置的信息判断。

3.  $f_2 = 9.2\text{Hz}$  主导的二阶脉动阻力系数  $C_{d2}$ ，如下图4-94所示：

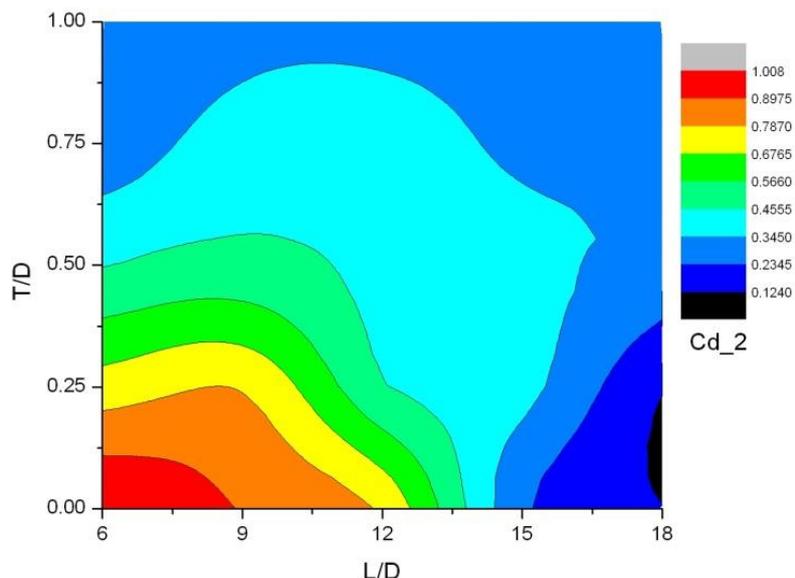


图4-94 二阶脉动阻力系数云图  $C_{d2}$

从上图我们可以看出关于二阶脉动阻力系数 $C_{d2}$ ：越靠近前方结构物即其值越大，峰值点处于纵向无因次距离 6，横向无因次距离 0，远离这个点时，其值依此减小，即所有梯度方向均指向这个点，可利用此来进行相对前方圆柱的横向与纵向位置的信息判断。

4.  $f_3 = 13.6\text{Hz}$  主导的三阶脉动阻力系数  $C_{d3}$ ，如下图4-95所示：

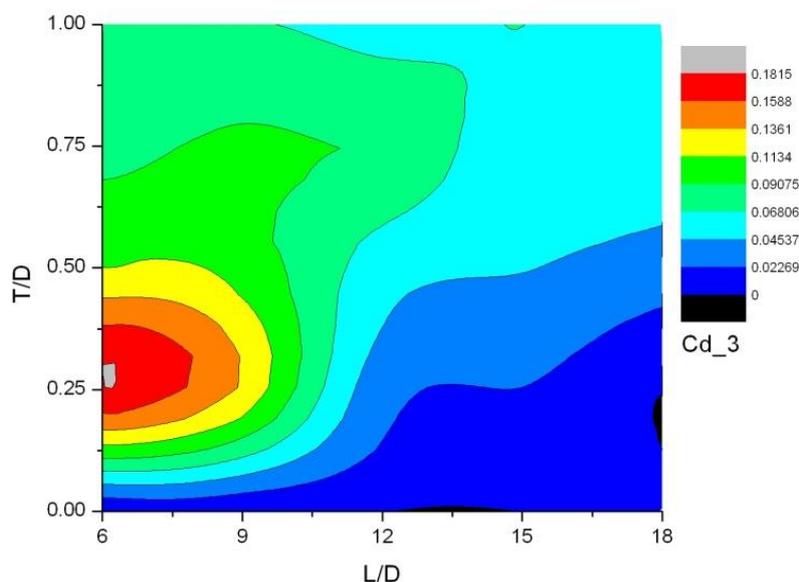


图4-95 三阶脉动阻力系数云图  $C_{d3}$

从上图我们可以看出关于三阶脉动阻力系数 $C_{d3}$ ：其变化规律大致与一阶脉动阻力系数 $C_{d1}$ 一致，即存在明显峰值点处于纵向无因次距离 6，横向无因次距离 0.25，所有梯度方向均指向这个点。但需要注意的是三阶脉动阻力系数 $C_{d3}$ 其幅值较小，考虑到存在背景噪声等干扰导致的误差，故其并不一定适宜作为判断标准。

5. 平均升力系数  $C_{l0}$ ，如下图4-96所示：

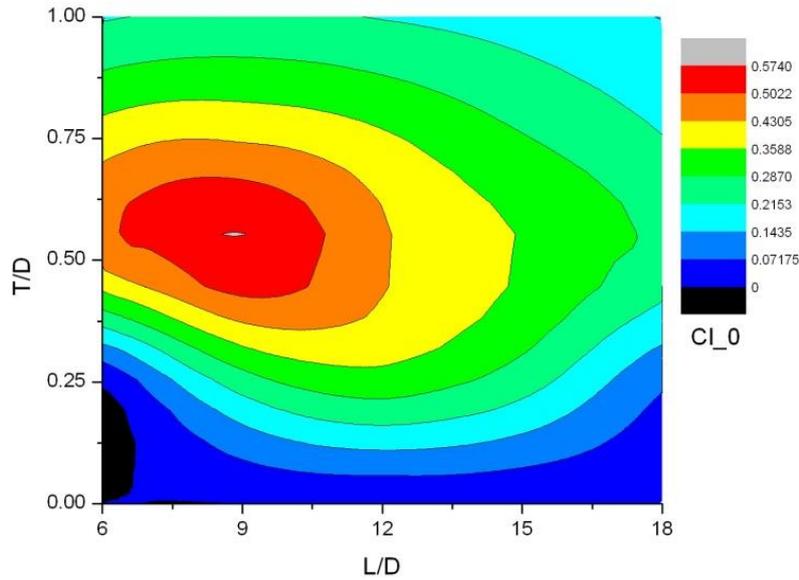


图4-96 平均升力系数云图  $C_{l0}$

从上图我们可以看出关于平均升力系数  $C_{l0}$ ：其变化规律为存在峰值点区域位于纵向无因次距离 9，横向无因次距离 0.5，同时所有梯度方向均指向该点。同时我们发现从横向无因次距离 0.5 至横向无因次距离 0 的梯度大于横向无因次距离 0.5 至横向无因次距离 1 的梯度，主要可利用此来进行相对前方圆柱的横向位置以及一部分纵向位置信息的判断。

6.  $f_1 = 4.6\text{Hz}$  主导的一阶脉动升力系数  $C_{l1}$ ，如下图4-97所示：

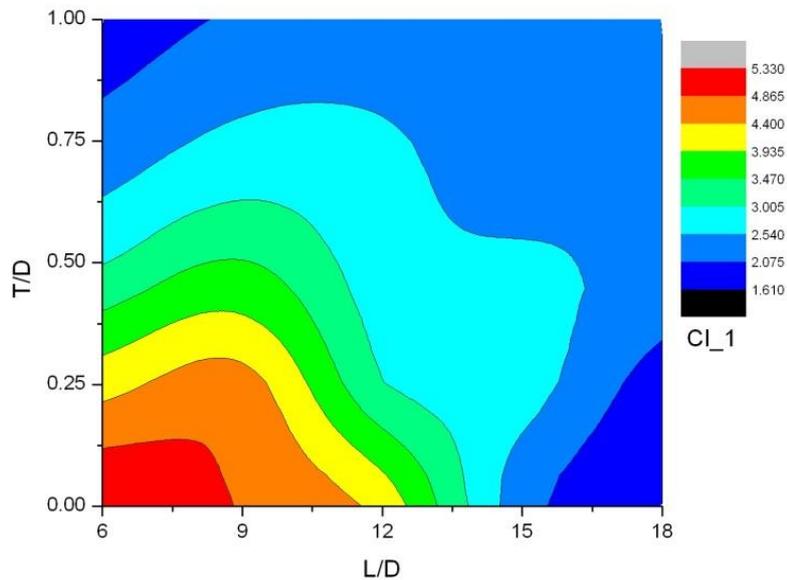


图4-97 一阶脉动升力系数云图  $C_{l1}$

从上图我们可以看出关于一阶脉动升力系数  $C_{l1}$ ：其变化规律大致与二阶脉动阻力系数  $C_{d2}$  相符，即所有梯度方向均指向越靠近前方结构物点，故可利用此来进行相对前方圆柱的横向与纵向位置的信息判断。

7.  $f_2 = 9.2\text{Hz}$  主导的二阶脉动升力系数  $C_{l2}$ ，如下图4-98所示：

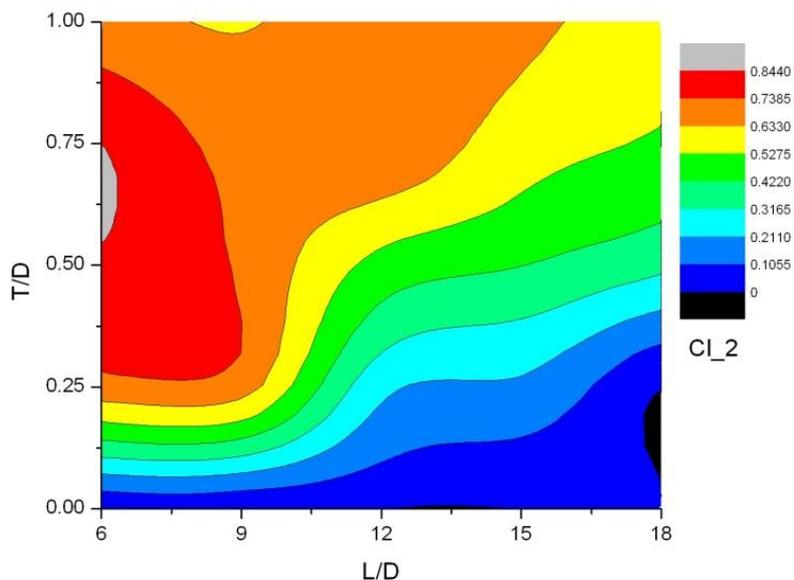


图4-98 二阶脉动升力系数云图  $C_{l2}$

从上图我们可以看出关于二阶脉动升力系数 $C_{l2}$ ：其变化规律为越远离横向中心，其值会相应增加，尽管其表现为存在峰值点区域位于纵向无因次距离 6，横向无因次距离 0.65 但主要可利用此来进行相对前方圆柱的横向位置的信息判断。

8. 平均扭矩系数  $C_{m0}$ ，如下图4-99所示：

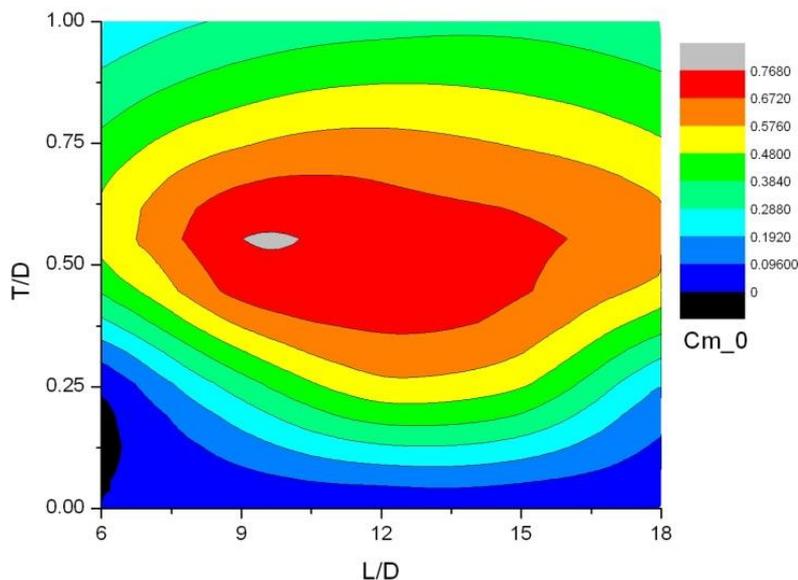


图4-99 平均扭矩系数云图  $C_{m0}$

从上图我们可以看出关于平均扭矩系数 $C_{m0}$ ：其变化规律大致与平均升力系数  $C_{l0}$  变化一致，存在峰值点区域位于纵向无因次距离 10，横向无因次距离 0.5，但相较于平均升力系数  $C_{l0}$ ，平均扭矩系数 $C_{m0}$ 主要用来进行相对前方圆柱的横向位置的信息判断。

9.  $f_1 = 4.6\text{Hz}$  主导的一阶脉动扭矩系数  $C_{m1}$ ，如下图4-100所示：

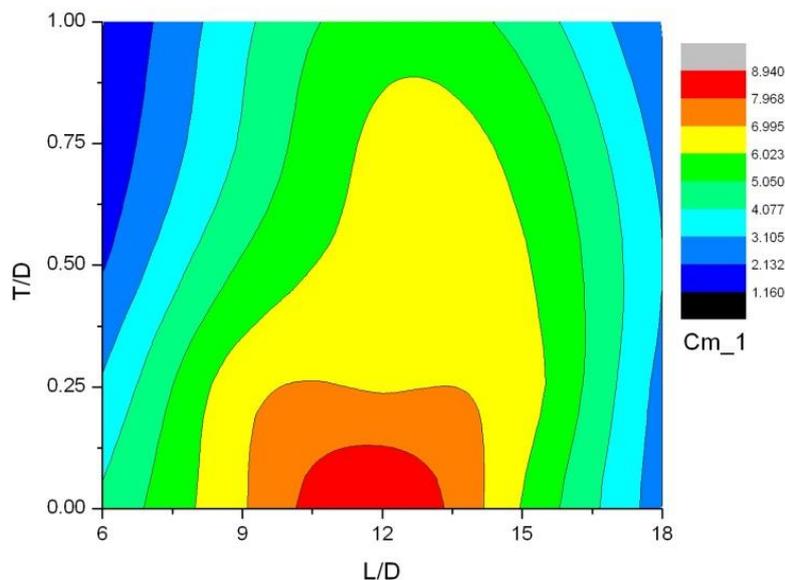


图4-100 一阶脉动升力系数云图  $C_{m1}$

从上图我们可以看出关于一阶脉动升力系数 $C_{m1}$ ：其变化规律为存在峰值点区域位于纵向无因次距离 12，横向无因次距离 0，即其可以主要用来进行相对前方圆柱的纵向位置的信息判断。

10.  $f_2 = 9.2\text{Hz}$  主导的二阶脉动升力系数  $C_{m2}$ ，如下图4-101所示：

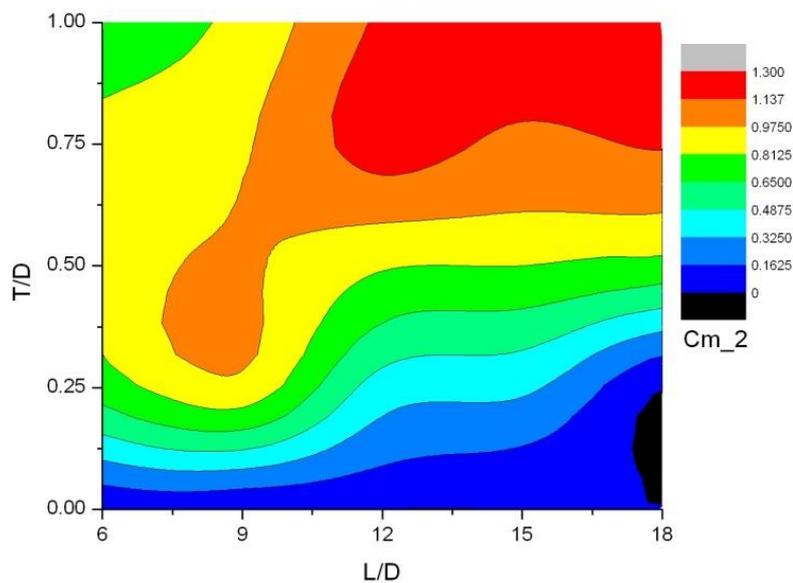


图4-101 二阶脉动升力系数云图  $C_{m2}$

从上图我们可以看出关于二阶脉动升力系数 $C_{m2}$ ：其变化规律为其峰值点区域位于远离靠近前方结构区域，即纵向无因次距离 18，横向无因次距离 1，其可以主要用来进行相对前方圆柱的横向位置的信息判断。

### 4.2.2 后方椭圆柱典型流场分析

由于篇幅与时间有限，不可能对所有工况中椭圆柱周围的流场进行阐述，这里只选择其中一个典型工况 L9\_T1，即纵向无因次距离为 9，横向无因次距离为 1 展开叙述。其完整流场涡量图如下图 4-102。

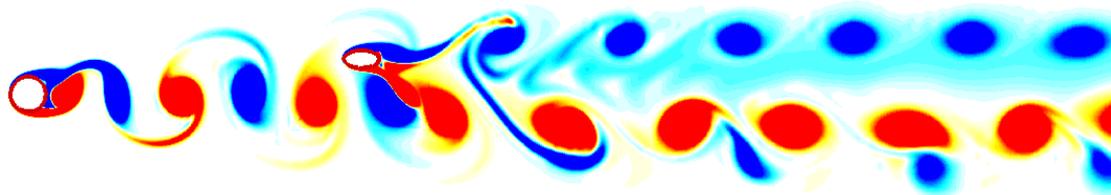


图 4-102 L9\_T1 完整流场涡量图

其瞬时涡量图，瞬时压力分布图，阻力系数  $C_d$ ，升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  时历变化图如下图 4-103 至图 4-112。

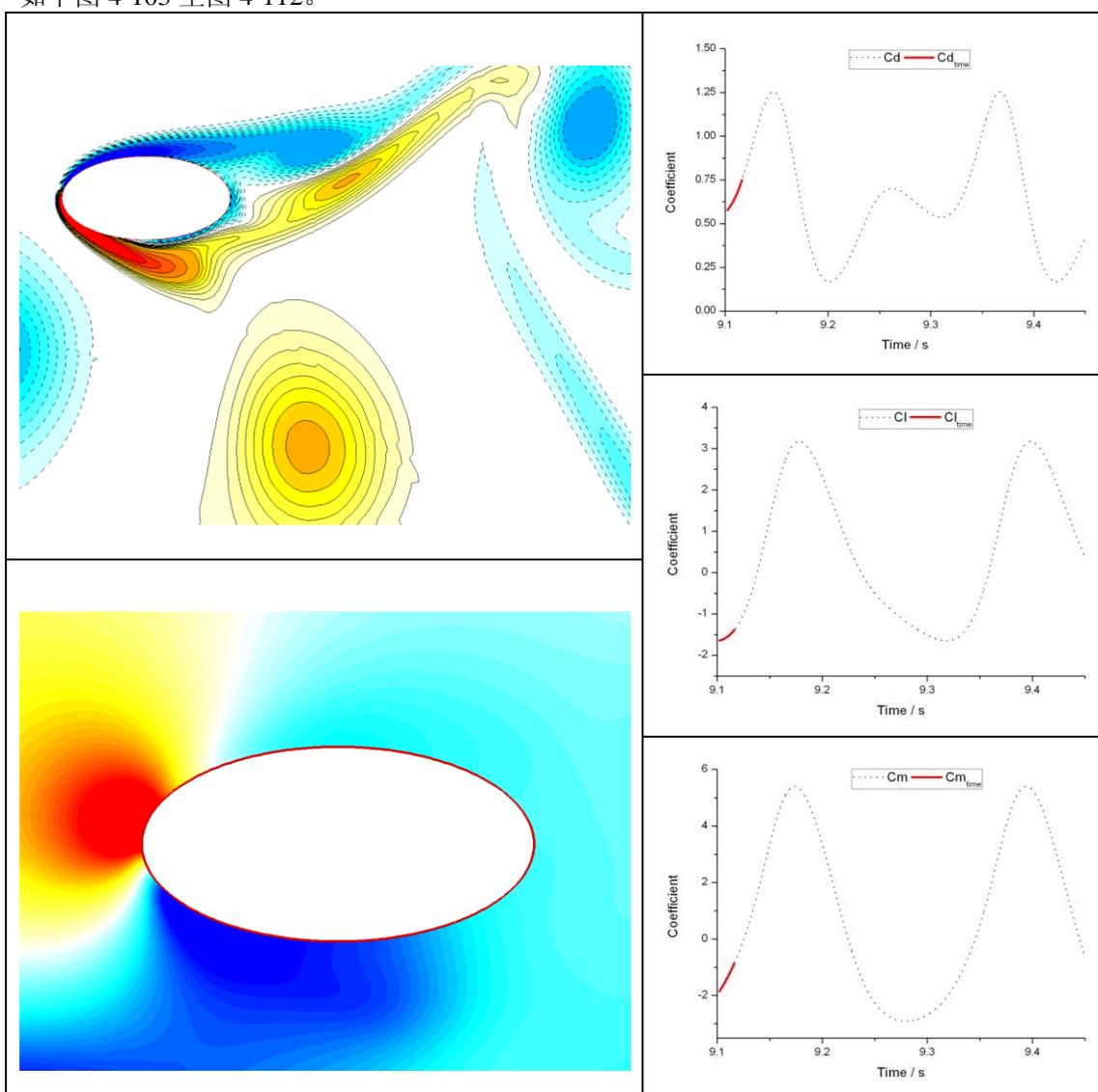


图 4-103 椭圆柱瞬时涡量图（左上），瞬时压力分布图（左下），阻力系数  $C_d$ （右上），升力系数  $C_l$ （右中），扭矩系数  $C_m$ （右下）时历变化图周围（9.11637s）

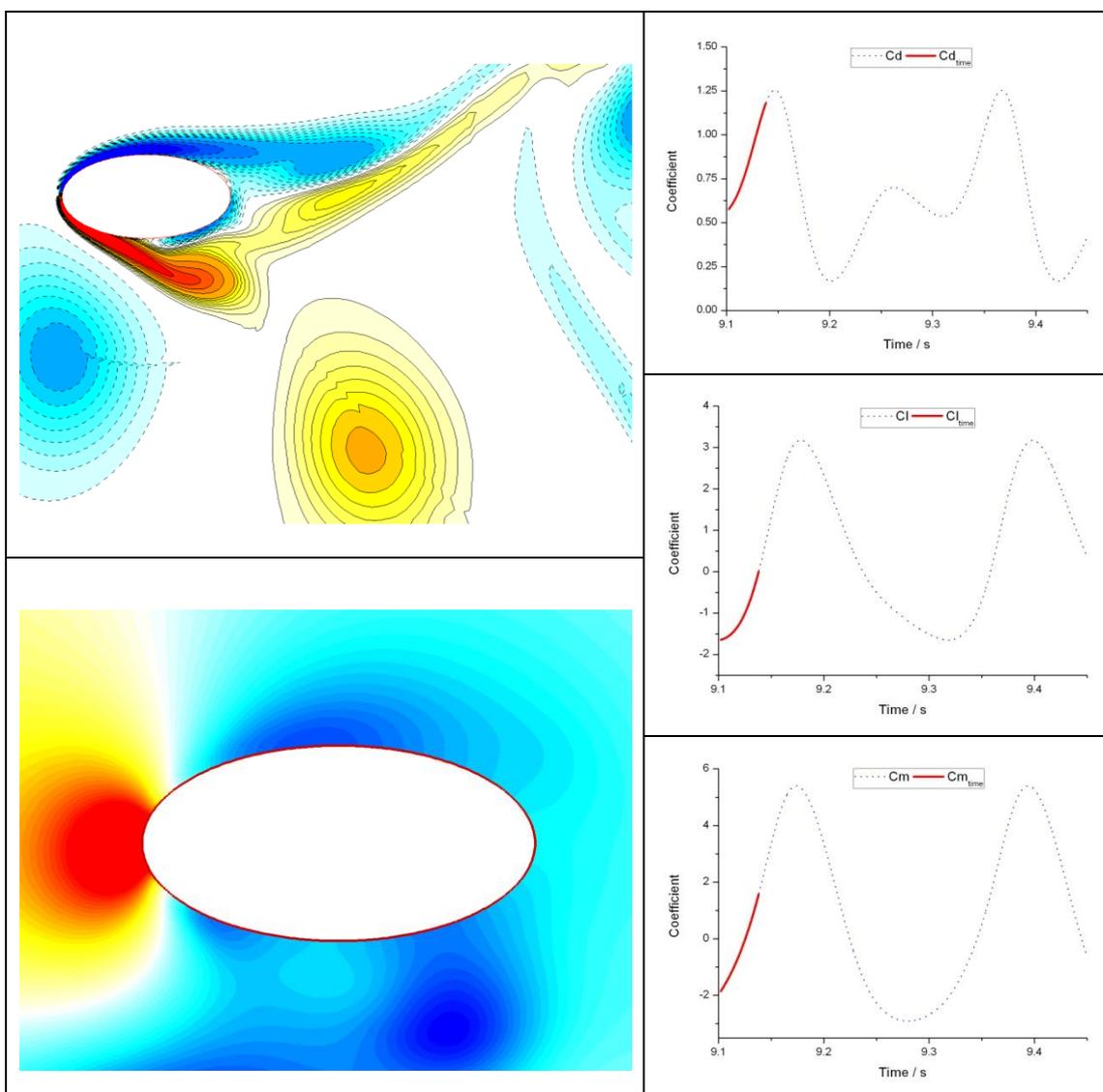


图 4-104 椭圆柱瞬时涡量图 (左上)，瞬时压力分布图 (左下)，阻力系数 $C_d$  (右上)，升力系数 $C_l$  (右中)，扭矩系数 $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.13806s)

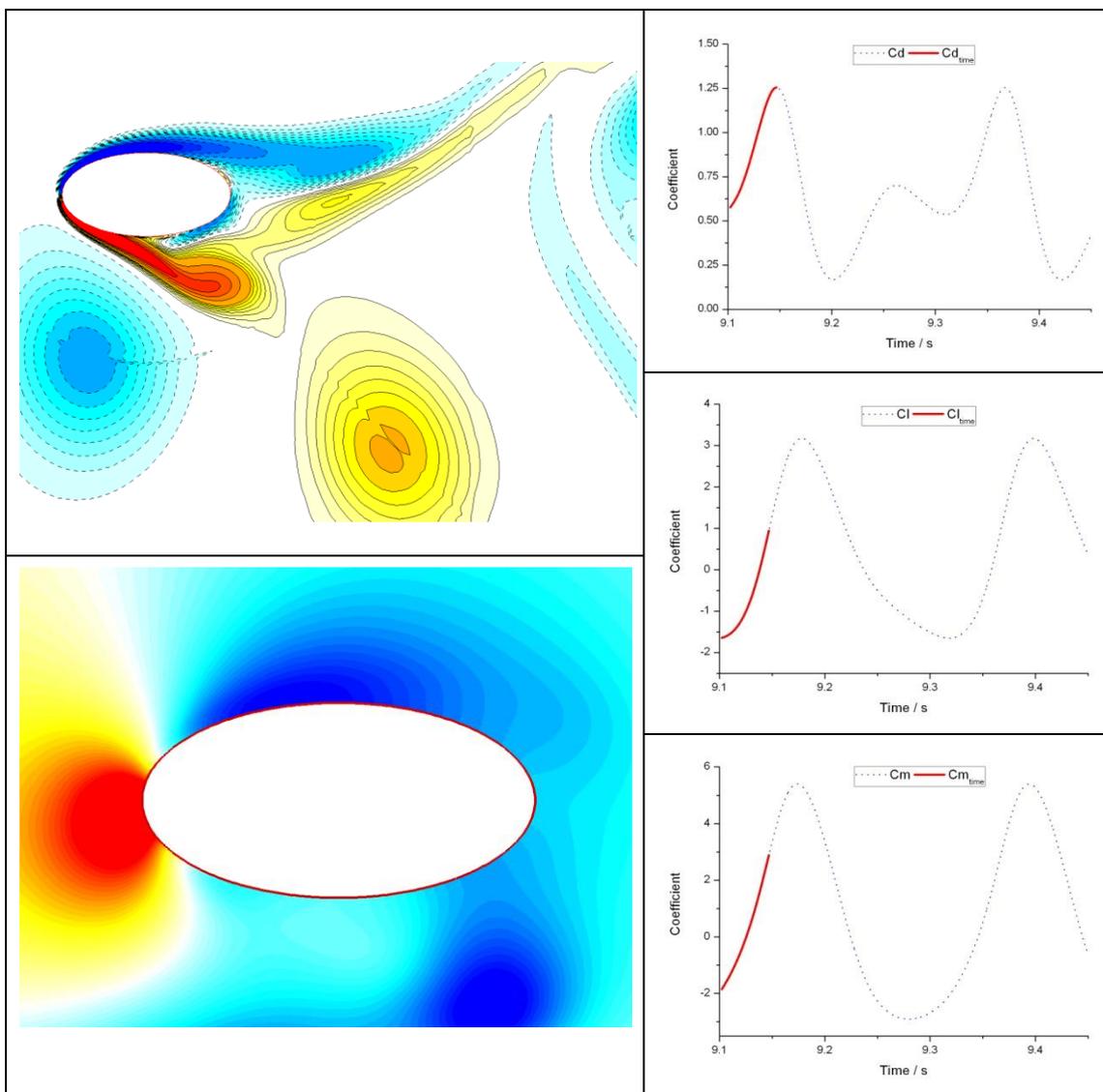


图 4-105 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数  $C_d$  (右上), 升力系数  $C_l$  (右中), 扭矩系数  $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.14688s)

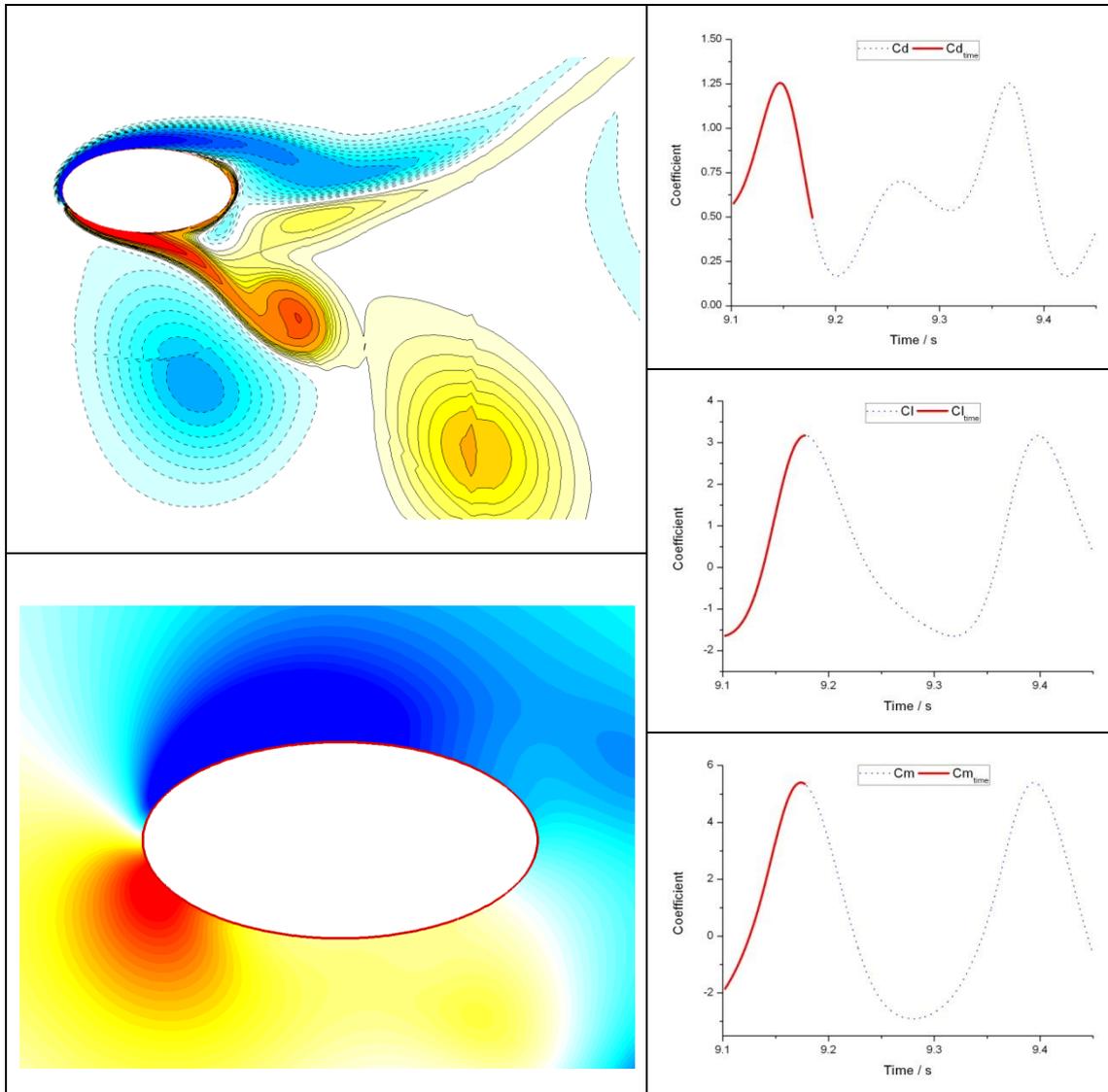


图 4-106 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数  $C_d$  (右上), 升力系数  $C_l$  (右中), 扭矩系数  $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.17784s)

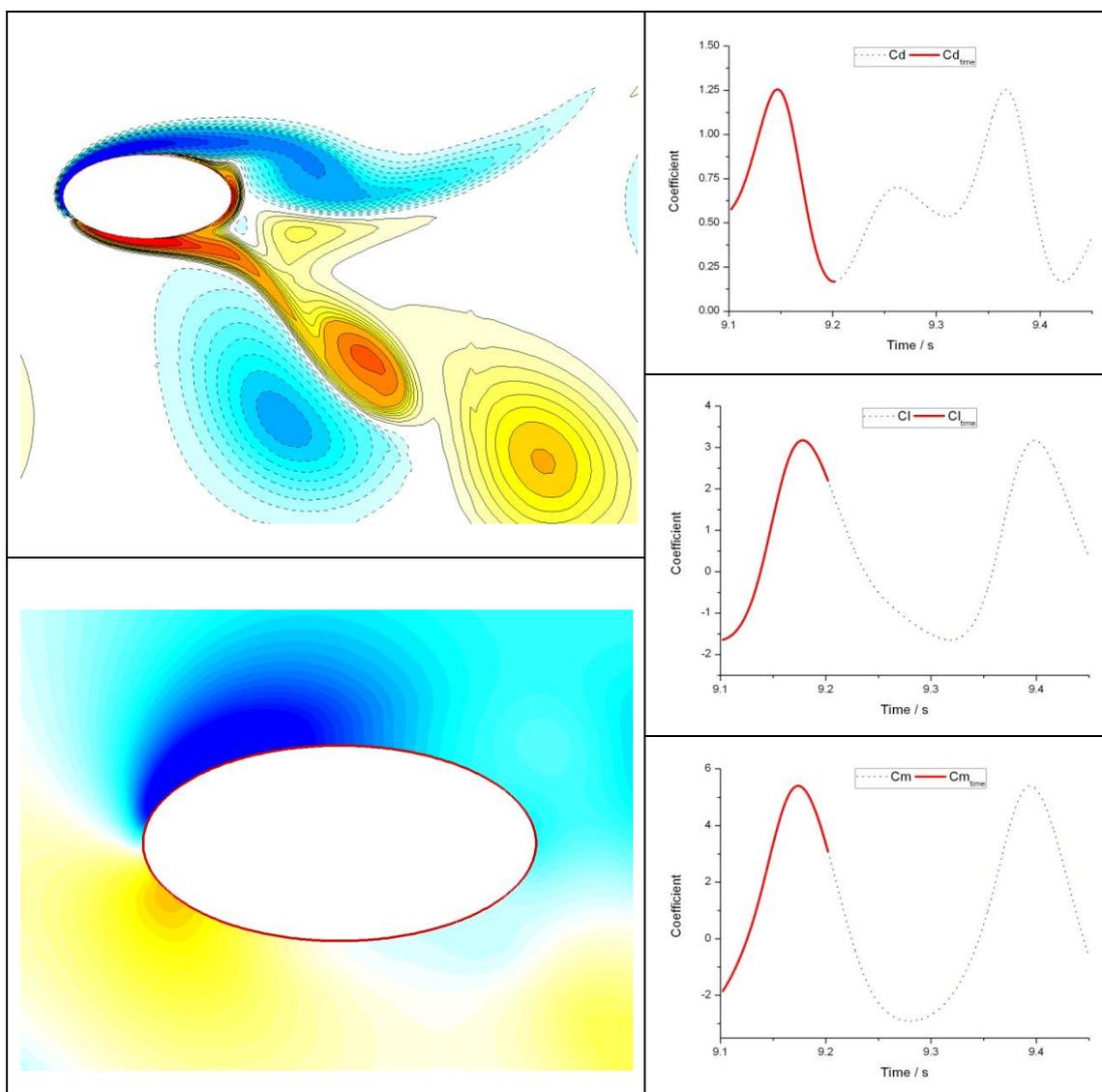


图 4-107 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数 $C_d$  (右上), 升力系数 $C_l$  (右中), 扭矩系数 $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.20214s)

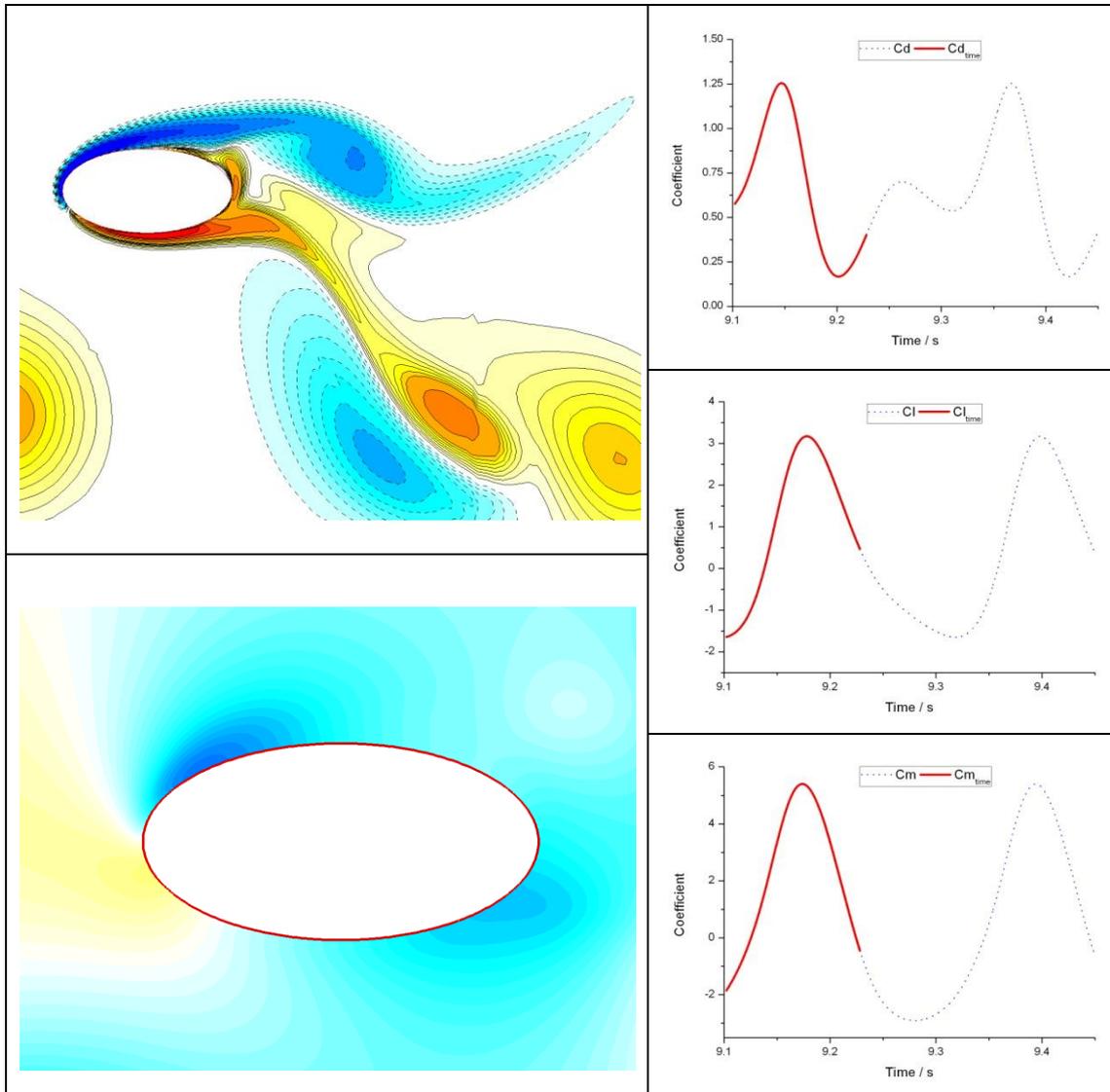


图 4-108 椭圆柱瞬时涡量图（左上），瞬时压力分布图（左下），阻力系数 $C_d$ （右上），升力系数 $C_l$ （右中），扭矩系数 $C_m$ （右下）时历变化图周围（9.22833s）

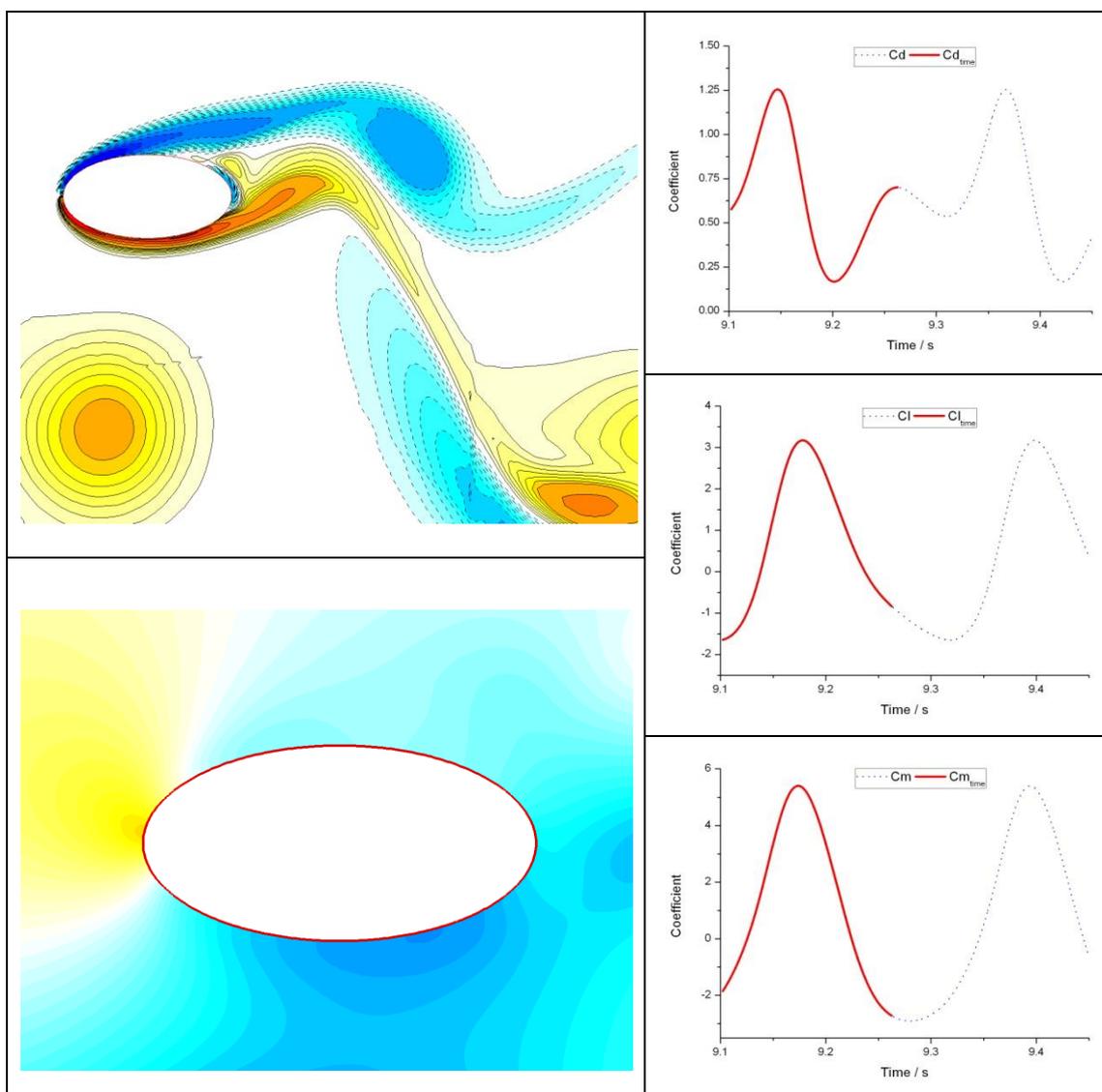


图 4-109 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数  $C_d$  (右上), 升力系数  $C_l$  (右中), 扭矩系数  $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.2626s)

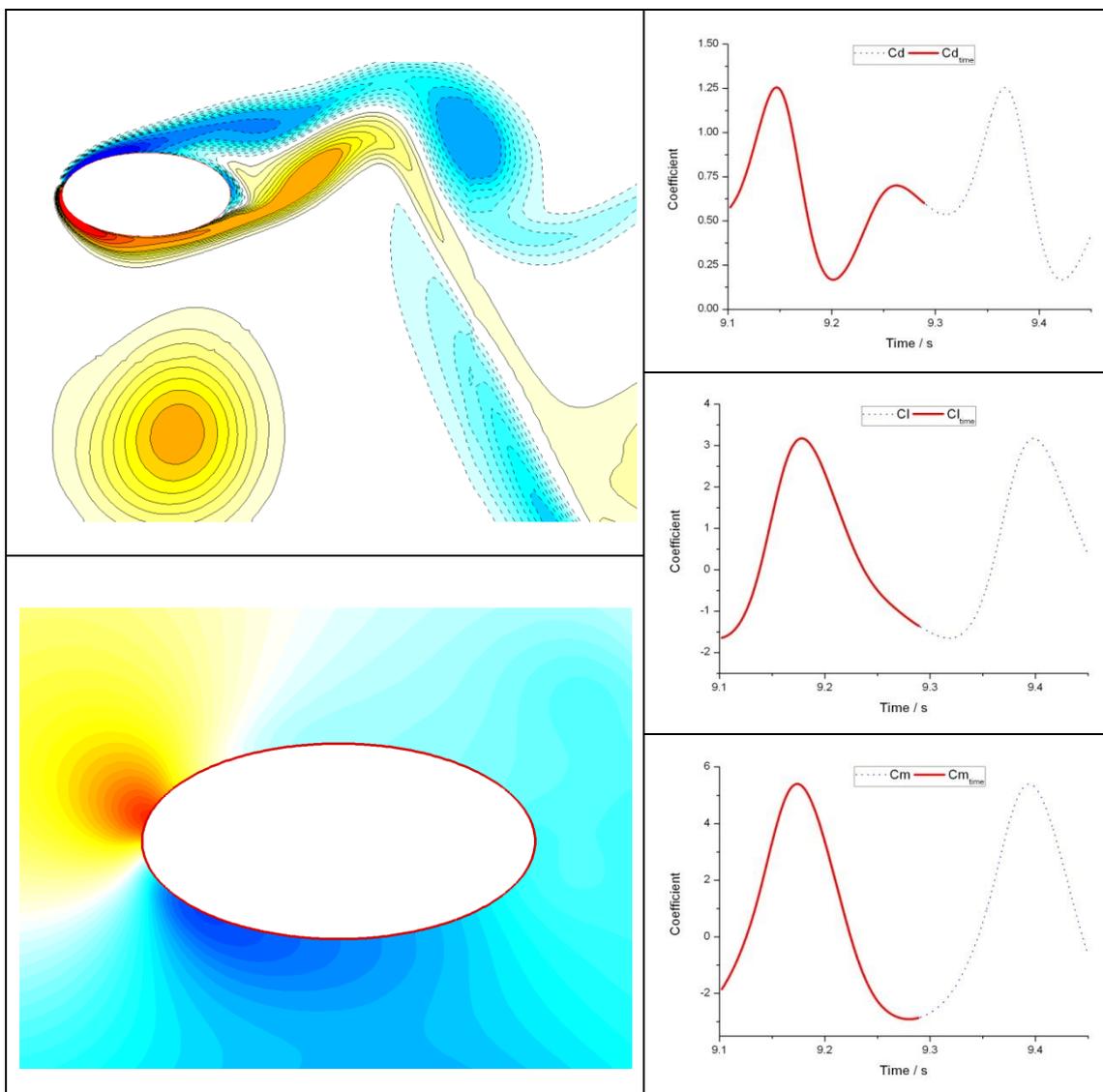


图 4-110 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数  $C_d$  (右上), 升力系数  $C_l$  (右中), 扭矩系数  $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.28926s)

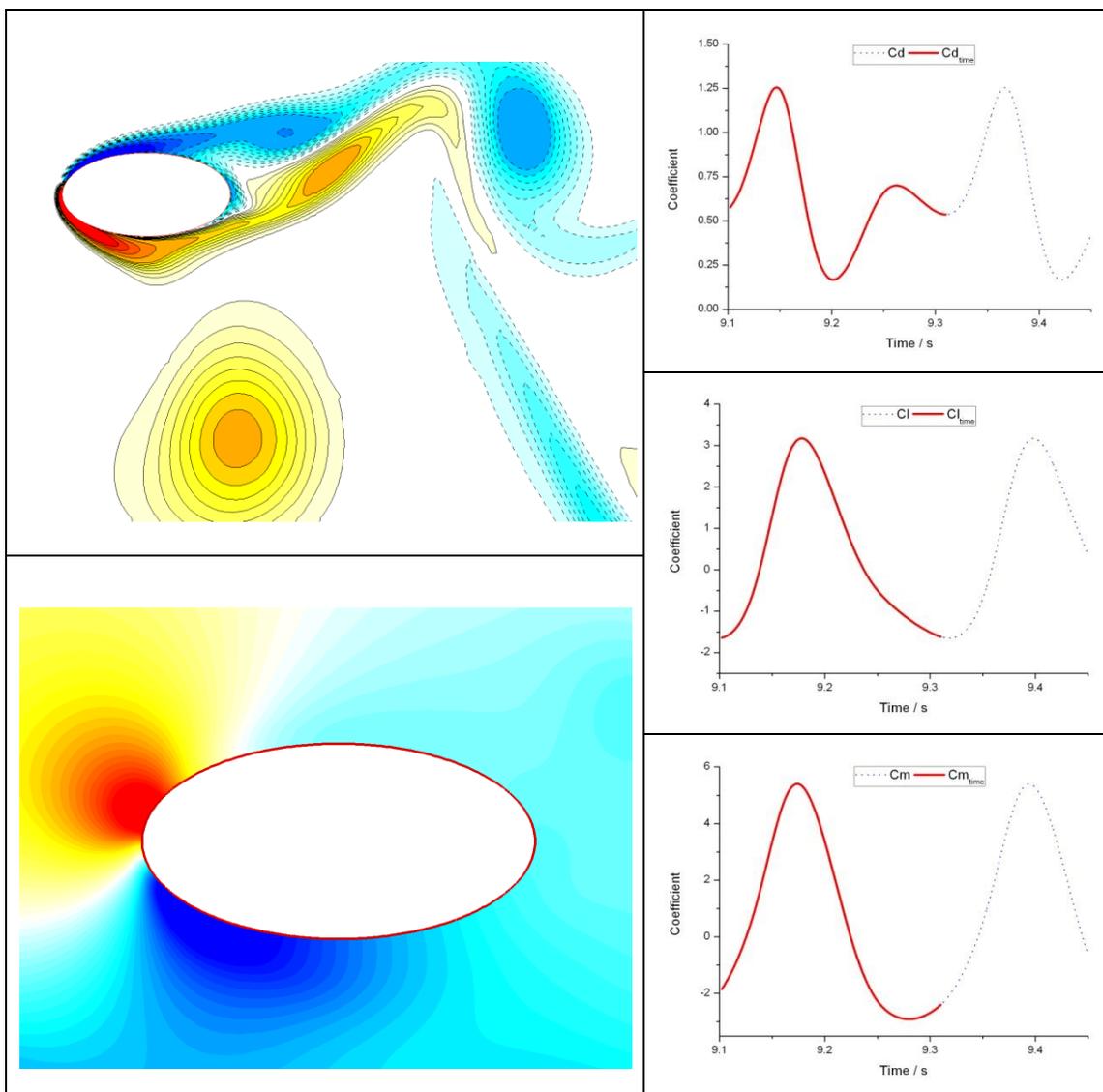


图 4-111 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数  $C_d$  (右上), 升力系数  $C_l$  (右中), 扭矩系数  $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.31014s)

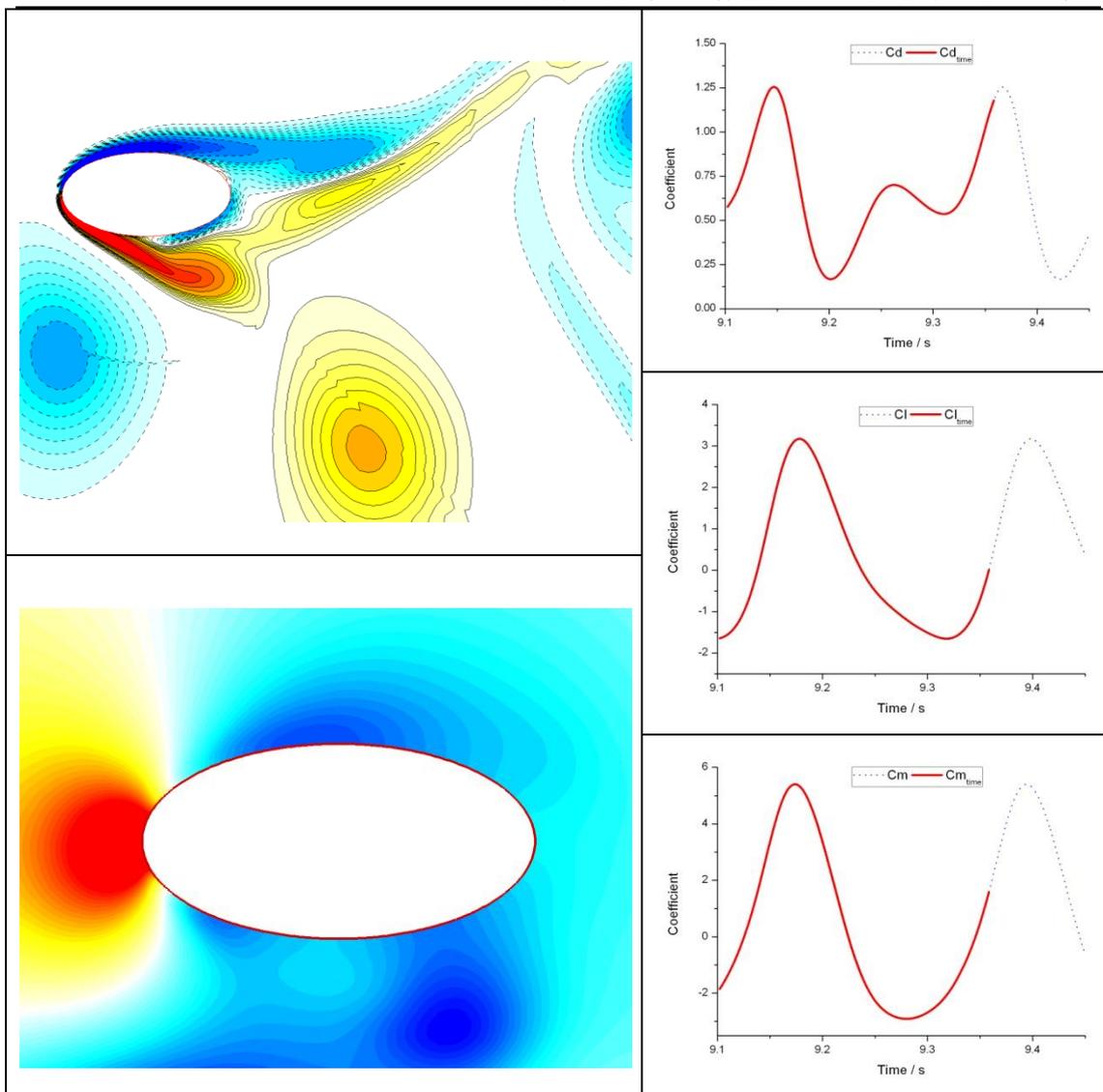


图 4-112 椭圆柱瞬时涡量图 (左上), 瞬时压力分布图 (左下), 阻力系数  $C_d$  (右上), 升力系数  $C_l$  (右中), 扭矩系数  $C_m$  (右下) 时历变化图周围 (9.35829s)

上面的十组图清晰反映了工况 L9\_T5 中椭圆柱与前方圆柱尾流区中漩涡相互作用的一个周期的物理过程以及其对应的水动力响应变化: 组图中包括了椭圆柱周围瞬时涡量场分布, 瞬时压力场分布, 以及其瞬时阻力系数  $C_d$ , 瞬时升力系数  $C_l$ , 瞬时扭矩系数  $C_m$  响应。通过上述组图我们可以如下结论:

1. 从整体来看, 当来流中的漩涡中心处于椭圆柱纵向靠近前方位置时, 会造成椭圆柱沿长轴的压力分布梯度变化剧烈, 即造成了椭圆柱实时阻力系数  $C_d$  处于极值, 而当前方漩涡中心发展至椭圆柱正下方时, 会造成椭圆柱沿短轴压力分布梯度变化剧烈, 即造成了升力系数  $C_l$ , 扭矩系数  $C_m$  处于极值处。
2. 对比椭圆柱在均匀流中驻点的表现, 从一系列涡量图可以看出, 在于涡相互作用的过程中, 椭圆表面的不再存在驻点现象, 速度零点沿着椭圆柱表面发生了幅值较大的移动, 而随着速度零点的移动, 高压力区的中点也相应发生了移动, 其中心点的最大值也发生了变化。这也是阻力系数  $C_d$ , 升力系数  $C_l$ , 扭矩系数  $C_m$  的脉动幅值发生了巨大的放大的原因。除此之外, 对于扭矩系数  $C_m$  来说, 高压力区虽然发生

- 了移动，但是移动幅值较小，依旧集中于椭圆柱前方区域，而对应的低压力区的移动范围非常之大，包括了整个椭圆柱表面，故对于扭矩系数  $C_m$  来说，其相较于椭圆柱在均匀流中基本保持为零的现象，发生了几个数量级别的放大。
3. 对于平均升力系数  $C_{l0}$  来说，其在椭圆柱在均匀流以及椭圆柱与前方圆柱工况中保持为零，而在横向有偏移的工况中为正值，这是由于横向偏移导致椭圆柱与来流中正涡量漩涡与负涡量漩涡的中心产生了差距，从压力分布图来看，表现我，低压力区的出现的概率较集中于椭圆柱外侧。
  4. 对于上一节中第一小节“椭圆柱受力时域特性”中提及的频率成分的变化此处可以从流场角度进行一定的解释：
    - a) 由于来流中的漩涡的存在，可以从涡量图中发现，椭圆柱自身的泄涡过程完全被前方漩涡掌控，即反应在水动力响应中阻力系数  $C_d$ ，升力系数  $C_l$ ，扭矩系数  $C_m$  表现为包含前方圆柱泄涡频率成分，且占主导。
    - b) 对于阻力系数  $C_d$  所包含的频率成分主要为三个，即一倍频，二倍频和三倍频成分。二倍频成分，即为前方圆柱的阻力系数  $C_d$  变化频率，即泄涡频率的两倍；而一倍频成分为来流中正涡量漩涡与负涡量漩涡对椭圆柱影响不一致，故与泄涡频率一致；而对于“椭圆柱受力时域特性”分析中不能理解的三倍频成分的出现，从流场角度，我们发现了椭圆柱后方出现了一个不会脱离的第三个漩涡（见图 4-103 至图 4-107），而三倍频正是由于这一个漩涡的“生”与“灭”而导致的椭圆柱水动力响应的表现形式。
  5. 对于上一节中第一小节“椭圆柱受力时域特性”中提及的阻力系数  $C_d$ ，升力系数  $C_l$  波形变化此处可以从流场角度进行一定的解释：
    - a) 升力系数  $C_l$  时历曲线中上升沿陡峭，下降沿缓和的现象从流场角度，我们可以发现，上升沿过程中正是涡量中心离椭圆柱较近的负涡量漩涡与椭圆柱相互作用的过程，而下降沿过程中则为涡量中心离椭圆柱较远的正涡量漩涡与椭圆柱相互作用的过程。负涡量漩涡由于离开椭圆柱较近，其对椭圆柱的效果亦比较剧烈，反之由于椭圆柱的存在，负涡量漩涡在经过椭圆柱附近时亦发生了巨大的变化，见图 4-108 与图 4-109，负涡量漩涡演化成了扁平状。故两者相互作用的结果是，负涡量漩涡以更快的速度经过椭圆附近，故来流中的负涡量漩涡将以更快的速度，更剧烈的影响诱导“切割”出椭圆后方的自身泄涡。反观正涡量漩涡的变化，由于其涡量中心相对椭圆柱较远，故两者的相互影响相对较弱，正涡量经过椭圆柱附近的速度较慢，同时其对另一侧椭圆柱的泄涡影响亦非常小，故出现了升力系数  $C_l$  时历曲线下降沿缓和的过程。
    - b) 在升力系数  $C_l$  时历曲线中下降沿中我们发现了有一个转折点，此时发现下降沿从此点至波谷处会包含一段变化相对更为平坦的区域，见图 4-109 至图 4-111。而对比阻力系数  $C_d$  的时历曲线，我们发现此时阻力恰正经历着波谷区的波动，而升力系数  $C_l$  曲线的转折点正是阻力系数  $C_d$  曲线波谷区波动的峰值处。观察流场发现这个时间点，正是上文提及我们发现的椭圆柱后方出现的不会后方的第三个漩涡“灭亡”的时刻。从图 4-108 至图 4-111，阻力系数  $C_d$  曲线经历波谷波动区，而在图 4-109 时刻，正是升力系数  $C_l$  曲线经历下降沿转折，阻力系数  $C_d$  曲线经历波动峰值，第三个漩涡“消失”的时间点。故可以推测正是这第三个漩涡的“灭亡”导致了升力的转折，阻力的波谷波动。

6. 对第三个漩涡的继续追踪, 我们发现其影响着阻力与升力最大值的出现, 其演化过程可大致归纳为, 成型, 成长, 远离椭圆柱, 逐渐回收靠近椭圆柱, 减弱, 直至最终的“消失灭亡”。
  - a) 第三个漩涡的成型, 成长, 远离椭圆柱的过程, 正是阻力达到最大值的过程, 即当其成型后远离椭圆柱, 阻力系数 $C_d$ 曲线达到最大值, 见图 4-105。
  - b) 第三个漩涡, 在受到来流漩涡的作用下, 如“弹簧”般向椭圆柱后方“回收”时, 正是升力达到最大值得过程, 即当其在“消失灭亡”前从远离椭圆柱的位置靠近椭圆柱后方时, 升力系数 $C_l$ 曲线达到最大值, 见图 4-106。

### 4.3 本章小结

本章首先分析了斑海豹胡须动物行为实验和结果, 并以此抽象出了本文的重点研究模型——两柱体绕流。之后在上一章数值模拟工作的基础上, 采用大涡模拟 (LES) 方法对二维任意布置的两柱体绕流问题进行了研究 (前方为圆柱, 后方为椭圆柱)。之后就后方椭圆柱的水动力时历信息与频域信息分布给出了分析, 发现了不同于均匀来流中椭圆柱的水动力响应的各个特点。同时在频域分析的基础上, 通过傅里叶级数的算法成功提取了水动力系数中不同频率所主导成分的幅值, 并依此为基础, 使用差分拟合, 绘制了相对前方圆柱不同横向纵向布置的椭圆柱水动力系数响应云图, 给出了椭圆柱感知前方圆柱的原理。此外并在所有工况中选取了一典型工况对其椭圆柱周围瞬时流场进行了深入地阐述, 就椭圆柱与来流中漩涡相互作用的物理过程给出了解释。

## 第五章 斑海豹胡须实验设计

前面的章节已经详细介绍了本论文的研究的背景，数值模型的抽象过程与结果，以及最终的数值结果。正如前文中所叙一样，对于数值模拟来说，由于计算机资源，数值算法的精度等问题，对于斑海豹胡须的远流场运动物体循迹机理的研究不得不采取大量的简化工作。故在条件允许的情况下，进行相关的实验研究工作是非常有必要同时很有意义的，这不仅更直观地，有效地获取真实环境的结果，为后续传感器的设计打下坚实的基础，更能在借此机会与数值结果相互映照，从而达到互相促进，加深对本课题深入理解的作用。本章主要在上文叙述的基础上，结合实验室现有条件，进行斑海豹胡须结构形式的多体绕流实验的设计，其主要目的如下：

1. 通过实验，观察寻找斑海豹胡须形式结构物在均匀流场中的表现形式，认识其抑制泄涡形成从而降低自然背景噪声的机理。
2. 寻找斑海豹胡须形式结构物在感知远前方结构物尾流场，从而推导前方流场环境的规律，得到如结构物形式（简单拓扑结构，如圆，椭圆，方形等），大小，位置（包括纵向、横向和垂向）等参数的改变对于胡须结构物的响应有何变化
3. 通过流场显示技术——PIV 流速实时测量技术来获得斑海豹胡须形式结构物与远前方结构物尾流相互作用的流场机理，从而进一步揭示胡须结构物复杂流固耦合响应的原理。
4. 通过对于和数值模拟计算工况相对应的简单拓扑结构双钝体绕流进行对比性实验，从而和数值计算结果相比较，相互促进，揭示结构物在远前方物体尾流区中的水动力表现。

### 5.1 装置介绍

结合上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院自主开发，制造的双向强迫振荡模型试验装置，见图5-1，开展相关实验设计。

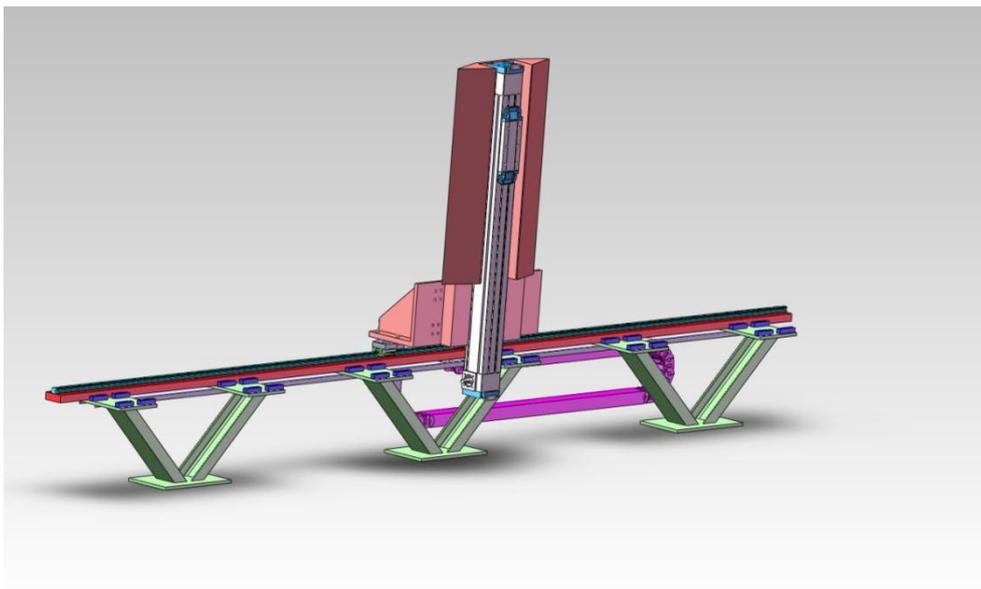


图5-1 双向强迫振荡模型试验装置的一侧轨道（设计效果图）



图5-2 双向强迫振荡模型试验装置的（实物图）

通过同步电机的运动，本装置能完成高精度的双向，即纵向与垂向，的各运动形式的动作控制。

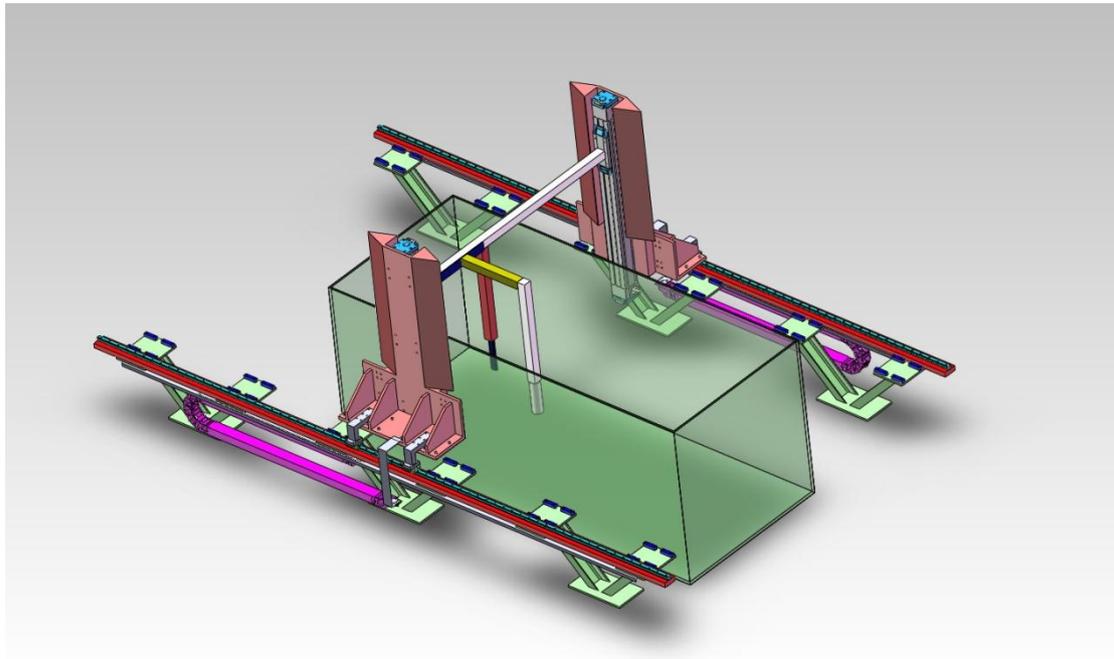


图5-3 装置试件预安装于水槽的三维模型（设计效果图）

#### 5.1.1 装置组成

本实验装置由水缸，中心导轨，两侧水平竖直导轨组成。三视图见下图5-4至图5-5。

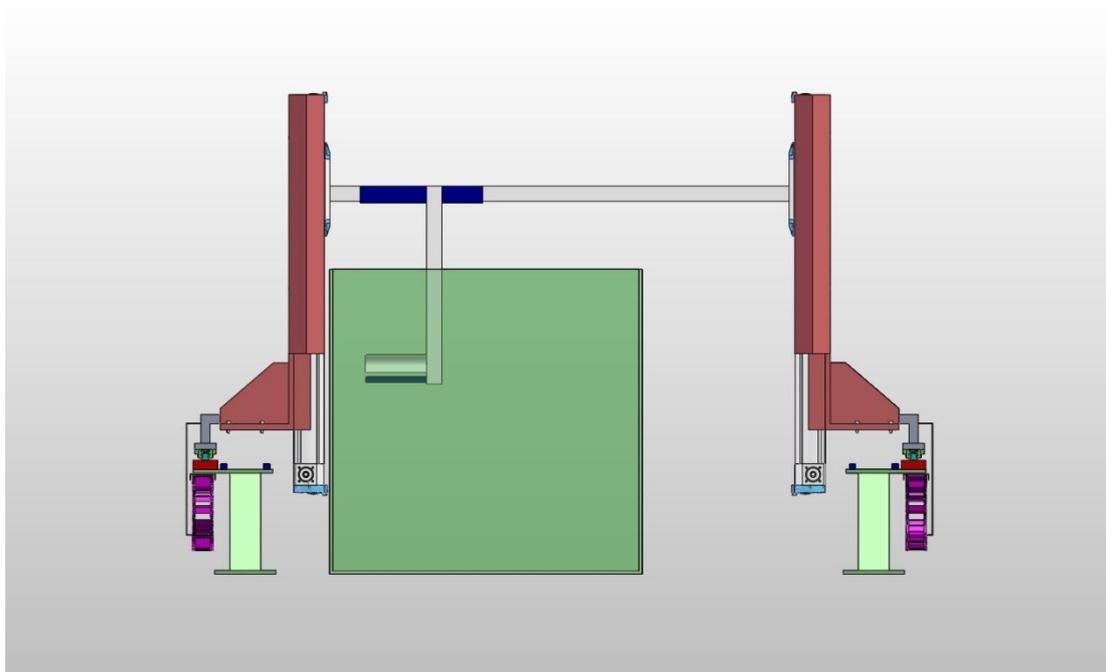


图5-4 实验装置正视图

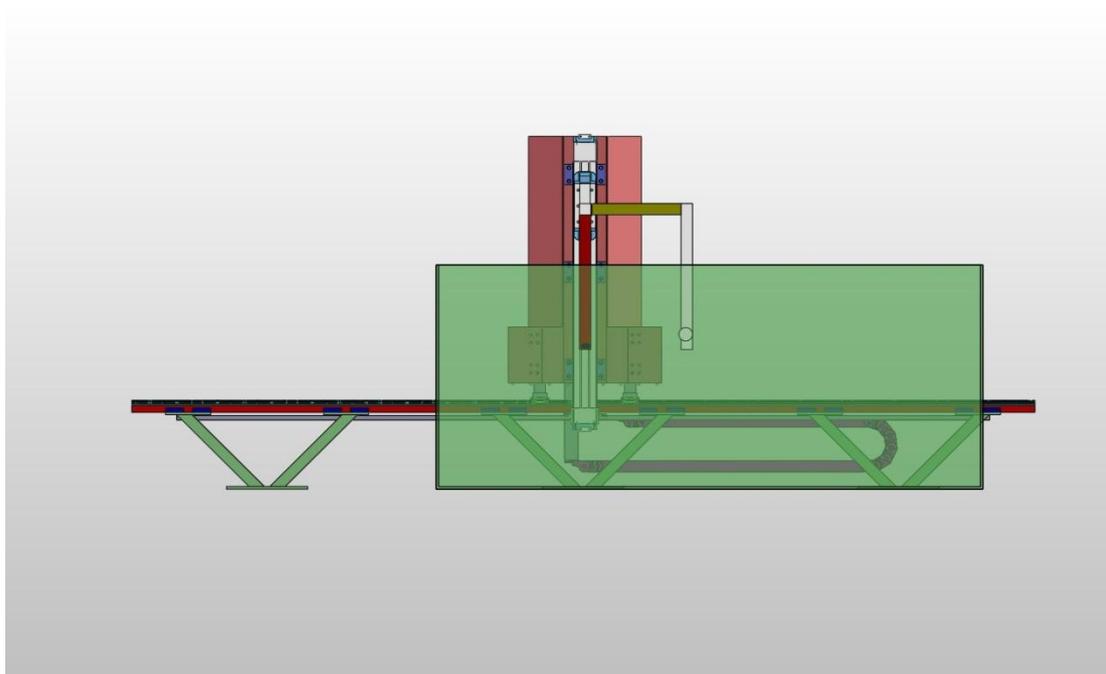


图5-5 实验装置侧视图

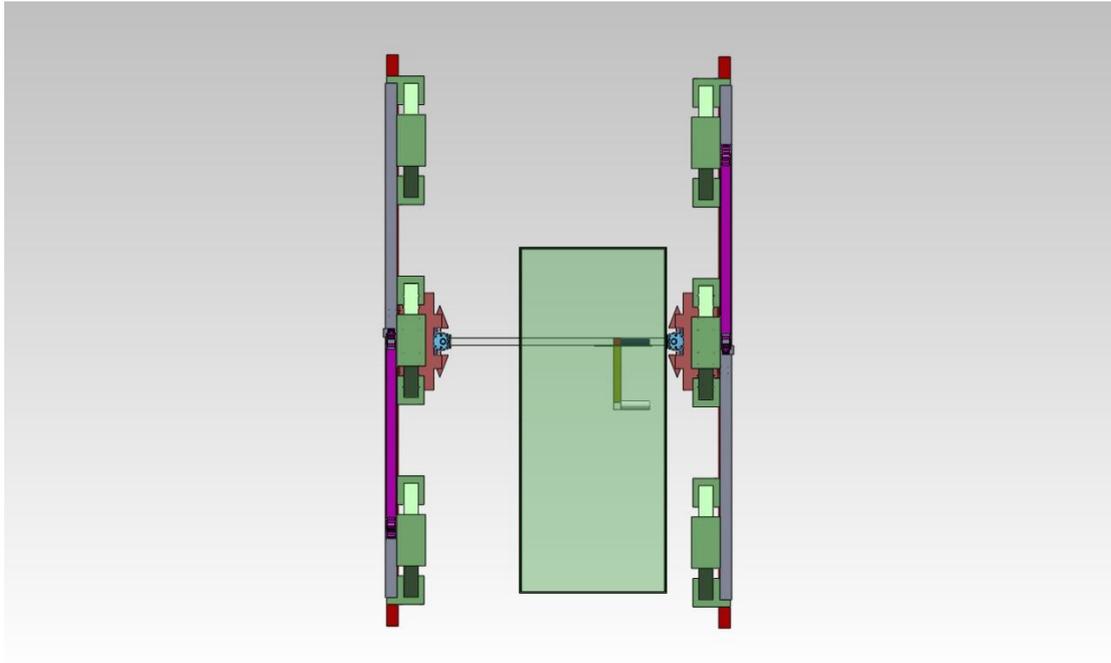


图5-6 实验装置俯视图

以上为整体装置的具体图样，导轨细节将不在此赘述，详情参考《立管涡激振动模型试验设计技术研究》<sup>[64]</sup>。

### 5.1.2 试件与传感器连接夹具设计

本小节将对传感器及其连接夹具的设计展开细节分析。

本次实验中涉及传感器为德国 ME 公司的 FC-k3d40三分力传感器，其量程范围为 -2N~2N，其结构形式见下图



图5-7 FC-k3d40三分力传感器

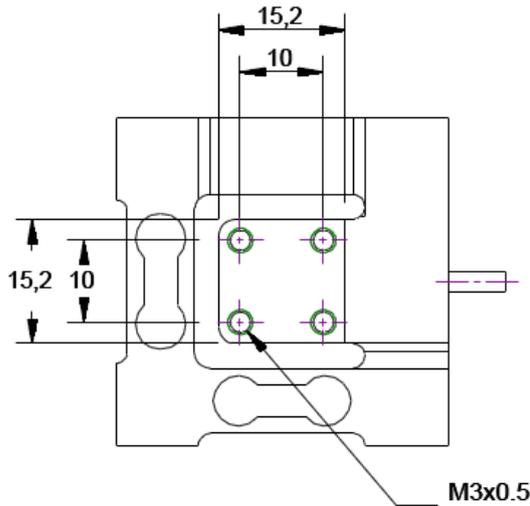


图5-5 FC-k3d40三分力传感器俯视图

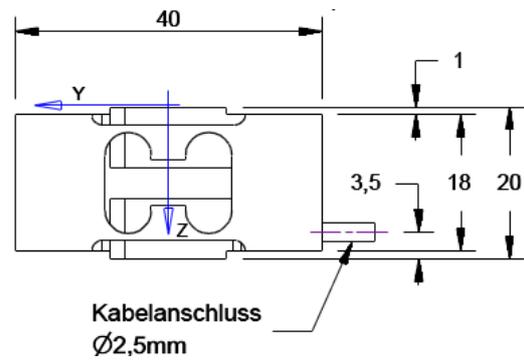


图5-6 FC-k3d40三分力传感器侧视图

有海豹真实胡须尺寸，如下图5-7至图5-8所示。



图5-7 左侧为斑海豹胡须，右侧为海狮胡须<sup>[26]</sup>

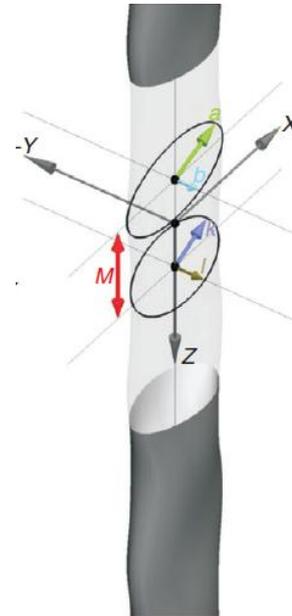


图5-8 FC-k3d40三分力传感器侧视图<sup>[33]</sup>

$$a = 0.595\text{mm}, b = 0.24\text{mm}$$

$$k = 0.475\text{mm}, l = 0.29\text{mm}$$

$$M = 0.91\text{mm}$$

实验中，取放大倍数为20与10两种尺寸的实验模型。

对于放大倍数为20的模型，其特征尺度为：

$$a_{20} = 11.9\text{mm}, b_{20} = 4.8\text{mm}$$

$$k_{20} = 9.5\text{mm}, l_{20} = 5.8\text{mm}$$

对于放大倍数为10的模型，其特征尺度为：

$$a_{10} = 5.95\text{mm}, b_{10} = 2.4\text{mm}$$

$$k_{10} = 4.75\text{mm}, l_{10} = 2.9\text{mm}$$

且都取工作段长度为182mm，即对于放大倍数20的模型来说经历10M 长度，而对于放大倍数为10的模型来说经历20M 的长度。同时配合设计工况，需要进行面向来流改变角度，

即 $0^\circ$ ， $45^\circ$ ， $90^\circ$ ，设计模型上端连接结构，即通过特点位置螺栓帽进行位置调整与固定。具体设计如下图5-9至图5-10所示。



图5-9 20倍放大模型设计图

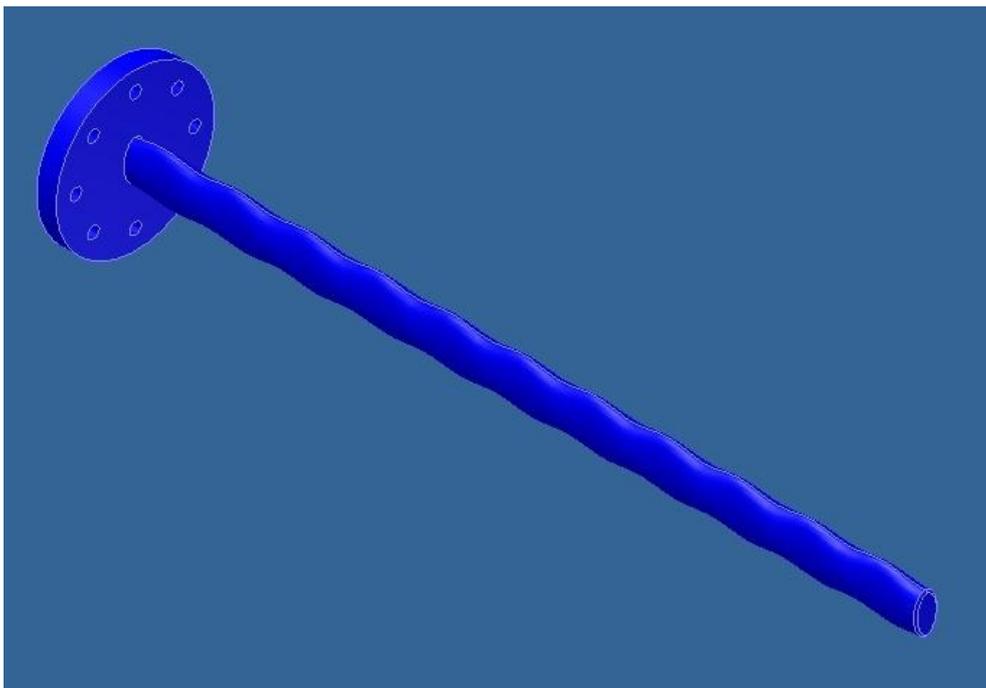


图5-10 10倍放大模型设计图

根据传感器以及实验试件设计两者之间的夹具，如下图5-11所示

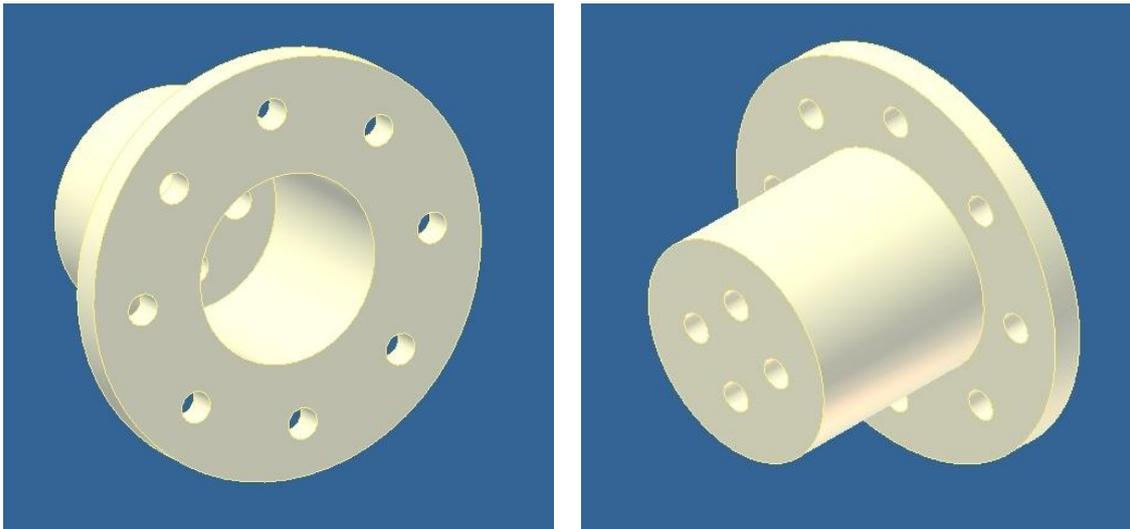


图5-11 夹具设计

故可以得到最终的安装效果图见图5-12

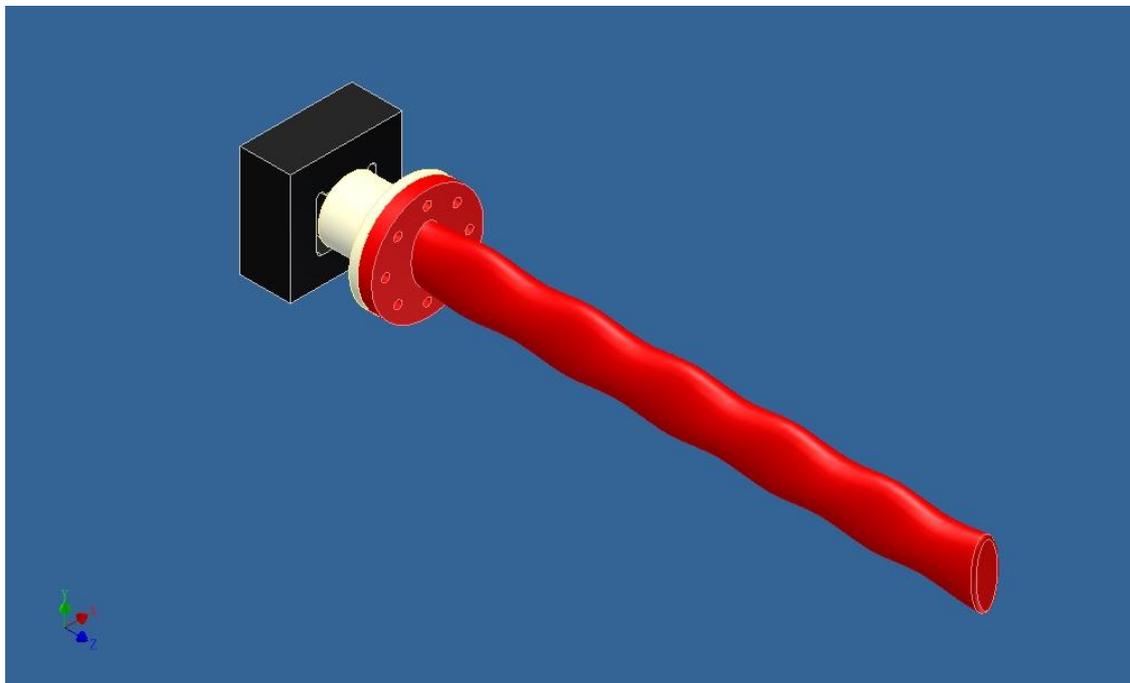


图5-12 传感器-夹具-试件安装效果图

### 5.1.3 中心支架

在设计完试件与传感器连接等工作后，需要完成中心支架的设计工作，此处仅仅给出中心支架大致分布以及工作能力，如下图5-13所示。

中心支架主要由一个横跨连接左右导轨的主横梁，固定安装后方斑海豹胡须形式结构，以及传感器的竖向梁一，固定前方柱体结构的竖梁二和调节两柱体横向与纵向距离的调节梁组成。图5-13中，白色方形梁部分为不可移动部分；红色方形梁部分为涉及后方柱体结构移动部分，可调节后方柱体的垂直方向距离，即在 PIV 流场显示实验柱体横向安置工况中，起到调节两柱体横向位置的作用；蓝色方形梁部分为涉及前方柱体结构移动部分，可调节前方柱体的左右方向距离，即在水动力测量实验中柱体垂向安置工况中，起到调节两柱体横向位置的作用；黄色方形梁部分为涉及前方柱体结构移动部分，可调节前方柱体的前后方向距

离，即在水动力测量实验中柱体垂向安置工况中与 PIV 流场显示实验中柱体横向安置工况中，起到调节两柱体纵向位置的作用。

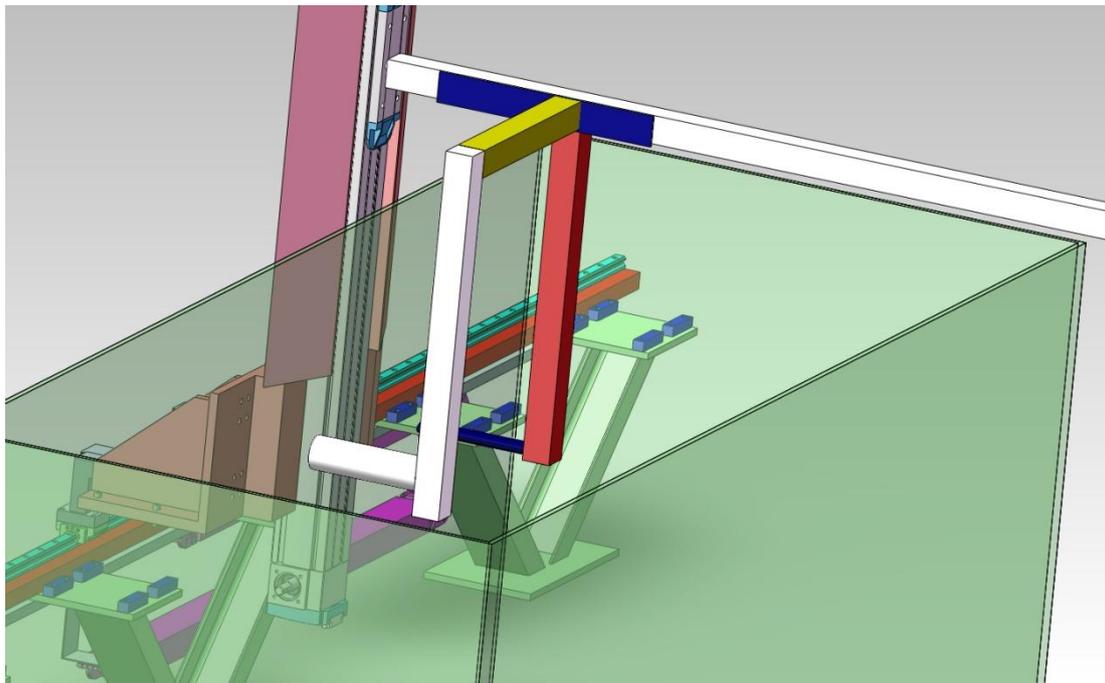


图5-13 中心支架大致分布图

## 5.2 工况设计

本次试验工况主要分为四大类：

1. 斑海豹胡须形式在均匀流中的水动力特性分析；
2. 斑海豹胡须形式在结构物尾流场中的水动力特性分析，如图5-13所示；
3. 斑海豹胡须形式在均匀流与结构物尾流场中的流场显示，如图5-14至图6-15所示；

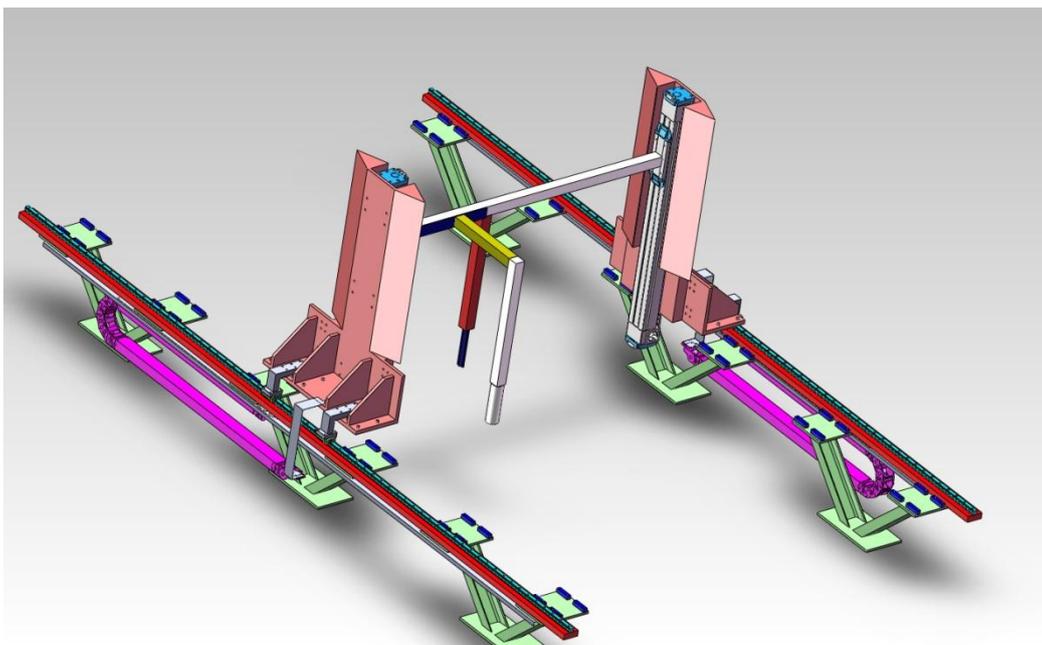


图5-14 两柱体垂直布置工况

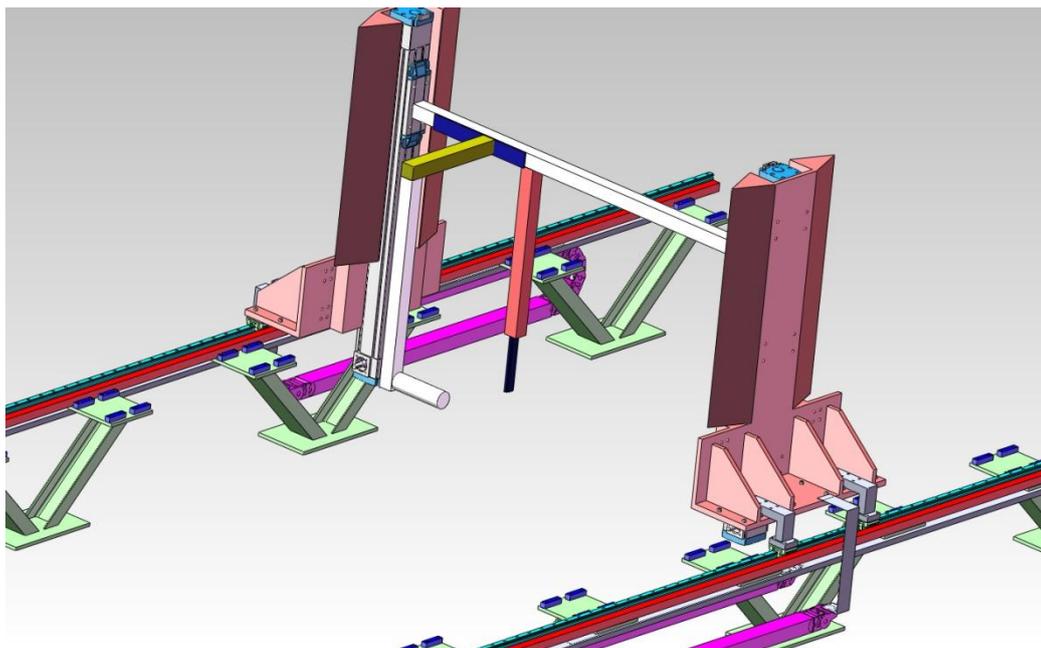


图5-15 一柱体垂直，一柱体横向布置工况

具体工况如下所示：

1. 第一类工况

表5-1 A类工况

序号	模型放大	角度	拖曳速度(m/s)
A1-1	10	0	0.2
A1-2	10	0	0.3
A1-3	10	0	0.4
A1-4	10	45	0.2
A1-5	10	45	0.3
A1-6	10	45	0.4
A1-7	10	90	0.2
A1-8	10	90	0.3
A1-9	10	90	0.4
A2-1	20	0	0.2
A2-2	20	0	0.3
A2-3	20	0	0.4
A2-4	20	45	0.2
A2-5	20	45	0.3
A2-6	20	45	0.4
A2-7	20	90	0.2
A2-8	20	90	0.3
A2-9	20	90	0.4

此类工况目的为获取起斑海豹胡须形式结构物在面向不同流速以及不同流向角时候的水动力响应，推测斑海豹胡须形式探测水流速度，以及水流方向的大致原理。并为之后的斑海豹胡须形式在前方结构物尾流场中的水动力特性分析获得可比较数据。

2. 第二类工况

表5-2 B类工况

序号	模型放大	角度	前方柱体圆尺寸 cm	纵向距离	横向距离
B1-1	10	0	2	6cm - 24cm 均匀7个	0cm - 6cm 均匀7个
B1-2		45	2		
B1-3		90	2		
B1-4		0	3		
B1-5		45	3		
B1-6		90	3		
B1-7		0	4		
B1-8		45	4		
B1-9		90	4		
序号	模型放大	角度	前方柱体圆尺寸 cm	纵向距离	横向距离
B2-1	20	0	2	9cm - 36cm 均匀7个	0cm - 9cm 均匀7个
B2-2		45	2		
B2-3		90	2		
B2-4		0	3		
B2-5		45	3		
B2-6		90	3		
B2-7		0	4		
B2-8		45	4		
B2-9		90	4		
序号	模型放大	角度	前方柱体圆尺寸 cm	纵向距离	垂向距离
B3-1	10	0	2	6cm - 24cm 均匀7个	4cm - 20cm 均匀5个
B3-2		45	2		
B3-3		90	2		
B3-4		0	4		
B3-5		45	4		
B3-6		90	4		

需要注意的是纵向距离与垂向距离的改变互相排列组合，组成不同形式，即以 B1类工况为例，纵向相对距离为7个（6cm，9cm，12cm，15cm，18cm，21cm，22cm），横向相对距离为7个（0cm，1cm，2cm，3cm，4cm，5cm，6cm），故共计49类变化。

此类工况目的为获取斑海豹胡须形式结构物在不同流向角时，在前方不同形式的结构尾流场中，两者处于不同相对位置时的水动力响应，推测斑海豹胡须形式探测前方尾流从而推测前方结构物时的原理。

3. 第二类工况

表5-3 C/D类工况

序号	模型放大	角度	前方柱体圆尺寸 cm	纵向距离	横向距离	典型截面
C1-1	10	0	2	6cm - 12cm 均匀3个	0cm - 6cm 均匀3个	峰处
C1-2		45	2			
C1-3		90	2			
C1-4		0	4			

C1-5		45	4			
C1-6		90	4			
C2-1	10	0	2	6cm - 12cm 均匀3个	0cm - 6cm 均匀3个	谷处
C2-2		45	2			
C2-3		90	2			
C2-4		0	4			
C2-5		45	4			
C2-6		90	4			
D1-1	-	-	2	6cm -	0cm -	-
D1-2			4	12cm 均匀3个	6cm 均匀3个	

第三类工况是使用 PIV 流场显示技术来观测斑海豹胡须形式在均匀流与结构物尾流场中与水质点相互作用的方式，从机理上理清斑海豹胡须形式其特殊的水动力特性的原因。故在工况设计中需要考虑 PIV 设备的布置情况，共胡须与结构物形式横向布置，CCD 照相机透过侧壁进行流场捕捉。

此处需要注意的是：D 类工况的设计是为了与斑海豹胡须形式在均匀流与结构物尾流场与水质点相互作用形式进行对比，此处需要对于圆柱在各个位置点处的尾流形式进行研究。

### 5.3 本章小结

本章在前文数值模拟的基础上，结合数值模拟的结果以及具体生物问题的抽象，基于现在海洋工程深水实验室已经开发的实验机器人，设计策划了一套后续的斑海豹胡须形式结构感知前方物体的实验。并就实验设备的整体结构，试件样式，试件与传感器连接方式等给出了详细的三维设计图纸，对于中心支架的形式给出了功能概念草图。同时在上述设计完成的基础之上，结合实验目的，实验条件等给出了相关实验工况设计以及阐述了各工况的实验目的，即所关注的实验研究重点。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 本文的主要研究成果

本文首先从一系列鳍足类动物斑海豹动物行为实验入手,在前人的实验研究基础上给出了对于斑海豹通过胡须获取水中信息,以进行识别与追踪远流场运动物体时的水动力特性为背景的实验结果分析。在阐述了水动力学研究过程中数值计算方法与实验流体力学各自的重点之后,结合钝体绕流的实验与数值模拟技术特点完成了以下工作:

1. 根据斑海豹胡须动物行为实验,分析抽象出合适的数值计算与实验研究模型。
2. 完成了基于SST  $k-\omega$  湍流模型的圆柱绕流二维数值模拟,分析了网格,去流段长度等在基于SST  $k-\omega$  湍流模型的数值计算中对于圆柱绕流远流场尾涡捕捉的影响。
3. 完成了基于大涡模拟方法(LES)的圆柱绕流与椭圆柱绕流二维数值模拟,并在此基础上分析了圆柱与椭圆柱后方时均流场与瞬时流场的信息。
4. 完成了基于大涡模拟方法(LES)的多柱体远流场绕流二维数值模拟,并在此基础上分析了椭圆柱在前方圆柱尾流场中的水动力表现形式。
5. 在数值计算的基础之上,结合了海洋工程深水实验室已开发的实验用机器人,设计了基于斑海豹胡须形式结构物的水动力实验。

在以上工作开展中,结合一系列特定的技术手段,成功获得如下的成果以及一系列相应的结论:

1. 分析获得了斑海豹胡须动物行为实验重要参数,得到了针对此次研究工作中的研究关键点,并以此对于问题进行了抽象简化。结合数值模拟计算资源和研究目的相平衡特点,成功获得了合理的理论数值研究模型;
2. 基于SST  $k-\omega$  湍流模型的圆柱绕流二维数值模拟研究工作表明,对于钝体绕流的远流场尾涡捕捉来说,SST  $k-\omega$  湍流模型并不适用,且与网格质量,计算步长,去流段长度等参数关联不大,判断得到基于SST  $k-\omega$  湍流模型对于钝体绕流远流场尾涡捕捉的适用性不佳;
3. 在基于大涡模拟方法(LES)的圆柱绕流与椭圆柱绕流二维数值模拟研究工作中,得到了圆柱与椭圆柱后方时均流场信息。通过分析柱体纵向 X 方向无因此时均速度分布,得到了两者在本文研究工作的各自雷诺数下的去流段长度,圆柱为0.5D至1.0D而椭圆柱为0.5D至1.3D。同时分析柱体横向 X 方向无因此时均速度分布,获得漩涡横向扩散在时均流场信息中所表现出的形式;
4. 在基于大涡模拟方法(LES)的圆柱绕流与椭圆柱绕流二维数值模拟研究工作中,圆柱与椭圆柱后方时均流场信息分析的基础,分析了流场瞬时信息,即泄涡过程。通过使用涡量图发现了,泄涡过程中圆柱与椭圆柱尾部表面在各自不同的雷诺数下都存在这永不脱离消失,相互竞争正反涡量对,同时其零涡量点的移动和泄涡现象有着直接关联。同时流线图追踪流体质点运动的方法,直观清晰地标识出正反涡量漩涡在圆柱与椭圆柱后方不同的“萌芽”生成,成长,脱离的位置与演化过程;
5. 傅里叶级数展开的数据分析方法能够很好地提取各不同频率主导下的水动力系数的幅值,即能很好地应用于对于后方柱体在前方结构物尾流场中的水动力表现形式的计算数据处理;

6. 通过云图分析的形式，找到了圆柱尾流区中后方椭圆柱各频率主导下的水动力系数幅值的变化规律，分析找到了：
  - a) 可以通过各系数频率的变化，即升力系数 $C_l$ ，扭矩系数 $C_m$ 的主频率的变化来推断前方圆柱的大致尺寸；
  - b) 可以通过各系数与椭圆柱在均匀流中的水动力系数的比较以及各系数自身随着椭圆柱与前方圆柱横向与纵向相对位置变化而导致的变化梯度从而来推断前方圆柱的大致方位；
7. 通过一个典型工况的流场，分析了圆柱尾流区中后方椭圆柱相较于均匀来流中的椭圆柱水动力响应发生变化的区别，即来流中漩涡与椭圆柱相互作用的过程，从而解释了阻力系数 $C_d$ ，升力系数 $C_l$ ，扭矩系数 $C_m$ 多频率，波形变化等现象的原因。同时发现了椭圆柱后方新生的不会脱离的第三个漩涡，并对其进行了跟踪分析；
8. 结合数值计算，动物行为实验的基础，深入分析，结合水动力实验技术与海洋工程深水实验室以开发的实验用机器人，设计了基于斑海豹胡须形式结构物的水动力实验，完成了实验中实验结构整体布置，实验试件，实验工况等的详细设计和实验中心支架的细节概念化设计。

## 6.2 研究工作的展望

所有的研究工作往往所带来的问题总比它能解决的问题多。本文研究亦如此，在得到了上述所有的成果与结论的同时，也有发现了需要提高和改进以及有待继续深入研究的内容。

对于现在数值计算所使用的模型来说，下一步工作总结如下：

1. 对于现在的简单二维拓扑结构的数值计算的结果需要进行进一步的挖掘，更多地从流场角度，即涡与结构相互作用的模式出发，对结构物在前方物体尾流区中的响应的机理给出更深入的解释；
2. 从实验角度出发，对上述数值模拟中使用的物理结构进行实验，并以此与数值模拟的结果相互对比；

同时对于斑海豹胡须结构形式的物体的进一步探索工作需要上述数值计算模型，以及本文提及的实验工作的基础上，进行更深入的研究，其方向如下：

1. 快速反应：目前对于由于数值模型计算的特点——固定绕流计算，对于机理的认识停留在长时间时历信息中提取阻力，升力与扭矩系数的各频率成分，而斑海豹显然能更快地找到这个结果，如何使用新的算法更快地寻找到目标信息将会是未来成功的传感器设计的关键点之一。
2. 三维效应：目前的数值计算工作由于计算资源的原因仅停留在二维问题上，而实际上斑海豹胡须形式结构有着非常复杂的三维结构。其三维结构对于其感知信息的能力有着如何的作用是有待于我们下一步在实验阶段中揭示的研究重点之一。
3. 刚柔转变：目前无论是抽象后得到的数值模型还是实验模型，都只停留在刚性结构物的基础之上，而实际上斑海豹胡须为有一定弯曲能力的柔性结构物，是否柔性结构形式，能否带给斑海豹更多的附加信息，如其特定的振动模态，弯曲曲率变化等，以供判断周围的环境流场情况。
4. 尺度作用：对于斑海豹本身来说，其主要的循迹追踪目标为其猎物——鱼，而未来新型的传感器形式所面向的目标是否为与鱼尺度一样的物体。同时在实验中我们选取了放大倍数为10与20的放大比例模型，这样是不是本身破坏了此类结构物的感知流场的能力，即过大放大倍数导致结构物破坏了尾流场中的漩涡结构，从而本身“滤

除”了尾流中原始包含的信息。亦或者过小的尺寸限制了传感器面向大尺寸物体，如潜艇等，的感知能力。

5. 阵列模式：斑海豹的胡须发达而稠密，且长短不一。显然其并不是通过其一根的胡须与水流相互作用而感知环境的，实在是使用了一系列胡须，类似用阵列形式的组合结构来探测从而完整描述整个流场环境的，故在完成单根胡须形式的结构物的研究之后，非常有必要对于多根胡须形式的结构阵列形式进行更深入的研究与认识。

## 参考文献

- [1] 何亚银. 逆向工程在结构仿生设计中的应用研究[J]. 陕西理工学院院报. 2012, 28(1): 11-14.
- [2] Au W W L, Ford J K B, Horne J K, et al. Echolocation signals of free-ranging killer whales (*Orcinus orca*) and modeling of foraging for chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 115: 901.
- [3] Nachtigall P E, Supin A Y. A false killer whale adjusts its hearing when it echolocates[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(11): 1714-1718.
- [4] Bleckmann H. Reception of Hydrodynamic Stimuli in Aquatic and Semiaquatic Animals (Progress in Zoology)(v. 41.)[J]. 1994.
- [5] Asadnia M, Kottapalli A G P, Shen Z, et al. Flexible, zero powered, piezoelectric MEMS pressure sensor arrays for fish-like passive underwater sensing in marine vehicles[C]//Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013 IEEE 26th International Conference on. IEEE, 2013: 126-129.
- [6] Kottapalli A G P, Asadnia M, Miao J M, et al. ELECTROSPUN NANOFIBRILS ENCAPSULATED IN HYDROGEL CUPULA FOR BIOMIMETIC MEMS FLOW SENSOR DEVELOPMENT[J].
- [7] Dusek J, Kottapalli A G P, Woo M E, et al. Development and testing of bio-inspired microelectromechanical pressure sensor arrays for increased situational awareness for marine vehicles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(1): 014002.
- [8] Kottapalli A G P, Asadnia M, Shen Z, et al. Piezoelectric sensor array for passive fish-like underwater sensing[C]//Sensors, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-4.
- [9] Kottapalli A G P, Asadnia M, Miao J M, et al. A flexible liquid crystal polymer MEMS pressure sensor array for fish-like underwater sensing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(11): 115030.
- [10] Valdivia y Alvarado P, Subramaniam V, Triantafyllou M. Design of a bio-inspired whisker sensor for underwater applications[C]//Sensors, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-4.
- [11] Gao A, Triantafyllou M. Bio-inspired pressure sensing for active yaw control of underwater vehicles[C]//Oceans, 2012. IEEE, 2012: 1-7.
- [12] Dehnhardt G. Sensory systems[J]. *Marine Mammal Biology, An Evolutionary Approach*, 2002: 116-141.
- [13] Schusterman R J, Kastak D, Levenson D H, et al. Pinniped sensory systems and the echolocation issue[J]. *Echolocation in bats and dolphins* (eds JA Thomas & CMM Vater), 2004: 531-535.

- [14] Hanke F D, Hanke W, Scholtyssek C, et al. Basic mechanisms in pinniped vision[J]. *Experimental brain research*, 2009, 199(3-4): 299-311.
- [15] Hanke F D, Dehnhardt G. Aerial visual acuity in harbor seals (*Phoca vitulina*) as a function of luminance[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2009, 195(7): 643-650.
- [16] Hanke F D, Scholtyssek C, Hanke W, et al. Contrast sensitivity in a harbor seal (*Phoca vitulina*)[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2011, 197(2): 203-210.
- [17] Dehnhardt G, Kaminski A. Sensitivity of the mystacial vibrissae of harbour seals (*Phoca vitulina*) for size differences of actively touched objects[J]. *Journal of experimental biology*, 1995, 198(11): 2317-2323.
- [18] Dehnhardt G, Mauck B, Bleckmann H. Seal whiskers detect water movements[J]. *Nature*, 1998, 394(6690): 234-236.
- [19] Dehnhardt G, Mauck B, Hanke W, et al. Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*)[J]. *Science*, 2001, 293(5527): 102-104.
- [20] Schulte-Pelkum N, Wieskotten S, Hanke W, et al. Tracking of biogenic hydrodynamic trails in harbour seals (*Phoca vitulina*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(5): 781-787.
- [21] Wieskotten S, Dehnhardt G, Mauck B, et al. Hydrodynamic determination of the moving direction of an artificial fin by a harbour seal (*Phoca vitulina*)[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(13): 2194-2200.
- [22] Wieskotten S, Dehnhardt G, Mauck B, et al. The impact of glide phases on the trackability of hydrodynamic trails in harbour seals (*Phoca vitulina*)[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(21): 3734-3740.
- [23] Wieskotten S, Mauck B, Miersch L, et al. Hydrodynamic discrimination of wakes caused by objects of different size or shape in a harbour seal (*Phoca vitulina*)[J]. *The Journal of experimental biology*, 2011, 214(11): 1922-1930.
- [24] Miersch L, Hanke W, Wieskotten S, et al. Flow sensing by pinniped whiskers[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366(1581): 3077-3084.
- [25] Hanke W, Wieskotten S, Marshall C, et al. Hydrodynamic perception in true seals (Phocidae) and eared seals (Otariidae)[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2012: 1-20.
- [26] Beem H, Hildner M, Triantafyllou M. Characterization of a harbor seal whisker-inspired flow sensor[C]//*Oceans*, 2012. IEEE, 2012: 1-4.
- [27] Valdivia y Alvarado P, Subramaniam V, Triantafyllou M. Design of a bio-inspired whisker sensor for underwater applications[C]//*Sensors*, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-4.
- [28] Hans H, Miao J, Triantafyllou M. Characterization of von Karman street with seal whisker-like sensor[C]//*Sensors*, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-4.
- [29] Beem H, Hildner M, Triantafyllou M. Calibration and validation of a harbor seal whisker-inspired flow sensor[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(1): 014012.

- [30] Knight K. Harbour seal whiskers detect fish trails 35 s later[J]. The Journal of Experimental Biology, 2010, 213(13): i-i.
- [31] Pannell J, Coales J D. Experiments on the interference between pairs of aeroplane wires of circular and lenticular cross section, British Advisory Committee for Aeronautics Reports and Memoranda No. 208[J]. Ann. rep, 1915, 7: 219-222.
- [32] Biermann D, Herrstein Jr W H. The interference between struts in various combinations[R]. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION HAMPTON VA LANGLEY RESEARCH CENTER, 1933.
- [33] Hanke W, Witte M, Miersch L, et al. Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations[J]. The Journal of experimental biology, 2010, 213(15): 2664-2672.
- [34] Hanke W, Wieskotten S, Miersch L, et al. On the Wake Flow Dynamics behind Harbor Seal Vibrissae—A Fluid Mechanical Explanation for an Extraordinary Capability[M]// Nature-Inspired Fluid Mechanics. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 271-289.
- [35] Beem H, Dahl J, Triantafyllou M. Harbor seal vibrissa morphology reduces vortex-induced vibrations[J]. Bulletin of the American Physical Society, 2011, 56.
- [36] Zdravkovich M M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements[J]. ASME Transactions Journal of Fluids Engineering, 1977, 99: 618-633.
- [37] Zdravkovich M M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 1987, 1(2): 239-261.
- [38] Williamson C H K. Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 159(1): 1-18.
- [39] 郭明曼. 双圆柱表面压力分布的同步测量及脉动气动力特性[D]. 复旦大学, 2005.
- [40] 郭明曼, 黄东群, 徐有恒. 串列双圆柱同步测压实验结果的相关分析[J]. 力学季刊, 2008, 29(1).
- [41] Chang K S, Song C J. Interactive vortex shedding from a pair of circular cylinders in a transverse arrangement[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1990, 11(3): 317-329.
- [42] 邓见, 黄钰期, 任安禄. 分块法研究圆柱绕流升阻力[J]. 力学与实践, 2004, 26(1): 24-26.
- [43] 陈文曲, 任安禄, 邓见. 下游圆柱涡致振动的升阻力特性及涡脱落模态分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(8): 1254-1259.
- [44] 邓见. 含运动物体三维复杂流场数值模拟和尾流结构研究[J]. 浙江大学博士学位论文, 2007: 67-75.
- [45] 刘岳元. 水动力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [46] SUMERB, FREDSDØEJ. Hydrodynamics around cylindrical structures[M]. Vol. 12.[S.l.]. World Scientific Publishing Company Incorporated, 1997.

- [47] Zhen-Su S, Jackson E, Orszag S A. Vortex structure and dynamics in turbulence[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1990, 80(1): 173-183.
- [48] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 国防工业出版社, 2005.
- [49] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [50] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 清华大学出版社有限公司, 2004.
- [51] Piller M, Nobile E, Hanratty T J. DNS study of turbulent transport at low Prandtl numbers in a channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 458(1): 419-441.
- [52] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [53] Wilcox D C. Turbulence modeling for CFD[M]. La Canada: DCW industries, 1998.
- [54] Jones W P, Launder B E. The calculation of low-Reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973, 16(6): 1119-1130.
- [55] Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, heat and mass transfer, 2003, 4: 624-632.
- [56] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 清华大学出版社, 2008.
- [57] Smagorinsky J. GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE EQUATIONS: I. THE BASIC EXPERIMENT\*[J]. Monthly weather review, 1963, 91(3): 99-164.
- [58] Xinliang T., Ong M. C., et al. Three-Dimensional Effects of the Flow Normal to a Flat Plate at a High Reynolds Number [C]//proc. 31st Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng.(OMAE 2012), Rio de Janeiro, Brazil. 2012.
- [59] 罗玮, 周孝德, 程文, 等. PIV 应用于气液两相流的研究现状[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(2): 1-3.
- [60] 崔恒. 流体二维图像测速技术的研究 [D][D]. 大连理工大学, 2006.
- [61] 康琦. 全场测速技术进展[J]. 1997.
- [62] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific american, 1995, 272(3): 64-71.
- [63] 刘卉, 邵雪明, 潘定一, 等. 鱼游推进的水动力学研究综述[J]. 舰船科学技术, 2011, 1.
- [64] 温鹏. 立管涡激振动模型试验设计技术研究 [D]. 上海交通大学大学, 2010

## 谢辞

终于本此本科毕业论文在我的导师付世晓教授的精心指导下顺利完成了。付老师对论文的内容方向和各种细节问题一直和我进行着热烈的讨论,不断地对我进行细心的指引和教导。因此,我最先要感谢付老师能够带给我这次难得的机会,让我通过此次毕业设计学到许许多多的知识,收获到了可以说是受用终身的财富。

从大三刚刚接触付老师的开始,付老师就逐渐以他独特的个人魅力感染着我。他一直指导着我在接触熟悉实验室工作的基础上要保持多看,多听,多思考,多讨论的习惯。所以在积极地参与实验室试验工作,在逐渐熟悉了圆柱绕流,涡激振动研究的方法和理论知识。通过付老师的言传身教,我认识到了研究工作是如何进行的,更重要的是,我培养起了一种对于研究的热情,以及一定的对于研究的敏感度。这也是这次由我自己逐渐提炼而出毕业论文研究由来的重要基石。我想这些无形的重要经验将成为我未来十年甚至一生的研究中的重要财富。

在这一年多的时间里,我也逐渐认识了付老师的研究团队中各位身怀绝技成员,能够结识他们是我另一个非常大的收获,同时融入到他们中我也感到十分的温馨。做事认真仔细但又幽默风趣的胡克师兄,希望你能多多保重身体多休息;实践经验丰富、稳重细心王俊高师兄,祝你在挪威学习生活精彩纷呈;极富研究天赋、具有探索精神宋磊建师兄,祝你在今后的学习工作中一切顺利;以及陈希恰,许玉旺,郭飞师兄,位巍师姐等,也祝你们学业有成,事业进步。本论文的完成也凝聚了这几位学长的关怀和帮助,他们对我在毕业设计过程中遇到的困难都给予了无私的帮助,而且不顾自己身上任务的繁重,总是耐心地倾听,细心地讲解。在此,我也真心的感谢他们,感谢他们给予我的支持帮助和鼓励,感谢他们无形中为我树立了学习的榜样。

同时,也感谢张昱,钟芊,魏汉迪同学以及其他所有一直陪伴我左右共同为学业奋斗的同学们,在我毕业设计过程你们的鼓励、倾听和交流也是我工作中动力的源泉,真心的感谢你们!

最后,也感谢一直关注着我的家人,是你们的鼓舞和支持伴随了我整个大学的成长,在这里我表示最真诚的谢意。

# RESEARCH ON THE IDENTIFICATION OF THE FAR WAKE OF THE OBJECT IN MOTION BASED ON THE HYDRODYNAMIC CHARACTERS OF THE HARBOUR SEAL'S VIBRISSA

After long time evolution, most aquatic animals have developed various sensory systems suitable for their own kinds, which help them to identify the environment characters (such as the obstacles in the darkness), locate then hunt the prey and also hide from their predators, etc. Commonly, all of these different kinds of sensory systems fall into two main categories, and those are “active” sensory system and corresponding “passive” sensory system. For example, with the active sonar system, dolphins are able to perform successful prey detection even in the dark and/or turbid waters. On the other hand, “passive” sensory systems are also found relatively common, such as the lateral line organ of several kind of fishes serving with the function of a hydrodynamic receptor. As for the pinniped species, such as the harbor seal and the sea lion, it has not been demonstrated in them either any “active” sensory system or the “passive” sensory system like the lateral line organ, and yet they shows a strong capability of long distance location of the prey in the darkness, indicting a new way of flow character detector, which has attracted several biologists' interests.

In order to explore this fascinating character of the pinniped species, Dehnhart, et al. conducted a series of animal behavior experiments on one of the pinniped species, the harbor seal. In the experiment, it was revealed in the harbor seal of one stunning “passive” whisker/vibrissa sensory system that when the visionary and auditory cues had been totally blocked for the harbor seal, by only using its highly sensitive whiskers tracking small water movements, the harbor seal managed to accomplish several item identification and/or location mission, such as the trail following of an autonomous underwater vehicle (AUV) . And the further study now has confirmed that the whiskers system is the most important organ for the pinniped species to extract several essential hydrodynamic characters from the flow, and thus guaranteeing their performances in the water.

This “magic” sensory ability of the pinniped species not only intrigues many biologists but also inspires the study and design of the new biomimetic sensors applied on the AUV able to detect flow characters. Currently, among all the prototype design of whisker-inspired sensors, one developed by the research group of Dr. Triantafyllou in MIT counted as most successful one. Based on the manufacture of their own designed sensor prototype (the main body is a 30:1 whisker scale model of the harbor seal), they have finished the laboratory calibration on the sensor

response towards flows of various velocities and directions and the real ocean situation validation with the sensor mounted on a CTD rosette.

Although the current biomimetic sensors succeed in capturing the characters of the incoming flows, such as the velocity and direction of the flow, there still a lot of advanced functions waiting to be explored. As a matter of fact, instead of using whiskers purely for the detection of the steady current, more commonly, the whiskers of the pinniped species are used for the long distance location of the moving fishes, by identifying the fishes' trails that contain vortices arranged in a highly complex, ladder-like, three-dimensional pattern, whose structures depends mostly on the body shape and swimming mode of the different species of fishes. And further related experiment further justify that harbor seal is able to discriminate the front objects of different sizes and shapes through the recognition of several hydrodynamic characters of the vortices in their wakes.

Under such circumstance, the main purpose of this paper is to deal with the problem of the identification on the far wake of the object in motion using response of a certain structure, and therefore is focused on three main aspects, shown as following:

1. First is to establish both a proper numerical and a suitable experimental model for this hydrodynamic research problem, by analyzing the results of the former animal behavior experiments and abstracting the key factors of the harbor seal vibrissa's strong ability of hydrodynamic information detection.
2. Second of all, the former researches of the problems on the flowing passing multiple bluff cylinders were mainly focused on the interaction among the multiple bluff cylinders, in one word, the near wake problem. So it is necessary, in this paper, to find out a reliable way to numerically stimulate the problem of the downstream cylinder's responses in the far wake of the upstream structure. In another word, a credible method should be found in capturing the vortices in the far wake of the structure, which creates the interactive environment for the downstream cylinder.
3. Based on the numerical results, the mechanism behind the problem of the identification on the far wake of the object in motion using response of a certain structure is meant to be revealed though view of the fluid-structure interaction. And several suggestions on the future corresponding sensor design is therefore given.

And the main idea of each chapter is listed as following:

1. The first chapter introduces the background and meaning of the research from the aspect of the development of the bio mimetic and the animal behavior experiment on the harbor seal's whisker serving as a passive sensory system to detect the hydrodynamic information in the environment. Later the related design and development progress of the new generation of the whisker-like sensor and the current situation in the field of the flow passing bluff cylinder are briefly discussed. In the end of this chapter, it is introduced the highlight of this paper, the purpose and method of the research and the content of the following chapters.
2. The second chapter generally deals with the fundamental theory and basic method related to this project, including the fundamental hydrodynamic theory, numerical simulation and experimental method used in the hydrodynamic related research. To begin with, the basic control equations in the fluid dynamics related to the problem of flow passing bluff

cylinders and its corresponding key non-dimensional parameters, such as Reynolds number, Strouhal number, etc., are introduced in succession. Moreover, in this chapter, an emphasis is laid on the introduction of the numerical simulation method, including finite volume method, boundary condition, etc., and two important turbulent models, SST  $k-\omega$  turbulent model and Large Eddy Simulation (LES) method. In the end, A brief illustration is made about the flow visualization technique widely applied in today's hydrodynamic experiments, the Particle Image Velocimetry(PIV).

3. In the third chapter, a numerical simulation on the 2-D problem of the flow passing a circular cylinder at  $Re = 1000$  is firstly conducted being applied with the SST  $k-\omega$  turbulent model. In this simulation, it is investigated the influence on capturing the vortices in the far wake of the upstream circular cylinder from various parameters, including the mesh quality, the width of the simulative area and the length of the outflow area. The result shows that the former parameters have little effect on preserving the vortices in the far wake and, conclusively, the SST  $k-\omega$  turbulent model is not very suitable for the far wake related problems, which indicts its incompatibility for the later numerical simulations on the flow passing multiple bluff cylinders in this paper. In this situation, the Large Eddy Simulation method (LES) is therefore introduced into the numerical simulation on the flowing passing circular cylinder at  $Re = 500$  and elliptical cylinder at  $Re = 250$ , which shows a satisfactory way to solve the problem of preserving the vortices in the far wake. And based on the results getting from this simulation, a brief report on the hydrodynamic force coefficients of both circular and elliptical at their separated Reynolds number is given and it is presented an extensive discussion on the fluid field around the bluff cylinders from the aspects of both time-average and instantaneous way. Especially for the instantaneous fluid field illustration, in order to get a good understanding on the vortex shedding process, both the vorticity field and streamline for the fluid particles methods are applied.
4. The fourth chapter is the essence of the whole research project, which provides with the analysis on the results obtained from the animal behaviour experiments on the harbor seal whisker, the simplification and the abstraction of the hydrodynamic numerical model, its results and corresponding discussions. After a numerous simulation using LES method on the elliptical cylinder in different stagger positions towards the upstream circular cylinder, the results are analyzed from both time-domain and frequency-domain way. In the time-domain, compared to the situation of elliptical cylinder in the uniform flow, a variety of different characters of the hydrodynamic force coefficients are revealed and reported in detail. And, from the aspect of the frequency domain, it is found out a multiple frequency components exiting in the response of the elliptical cylinder. Later, based on the Fourier series algorithm, it is clarified the amplitude of each hydrodynamic force coefficients dominated by different frequency components,. And later all the components are concluded into colored contours through fitting and difference method, which offers an insight into the possible way of using the hydrodynamic response of the elliptical cylinder to deduce the arrangement of the upstream circular cylinder. Finally in this chapter, a typical numerical simulation case is selected to illustrate how the vortices

in the far wake of the circular cylinder interact with the elliptical cylinder and therefore to briefly explain the mechanism behind the mutation of the structural responses.

5. In the fifth chapter, a sketch design of a hydrodynamic experiment on the scale model of the harbor seal whisker is presented. Base on the numerical simulation in the former chapters and the animal behavior experiment, the concept of a hydrodynamic experiment on the related problems is proposed and its corresponding whisker form scale model and the experiment devices are presented in 3-D model design.
6. The sixth chapter gives a conclusion on all the works presented in the former chapters and more importantly, the problems and future outlooks on this research are clearly illustrated in succession.