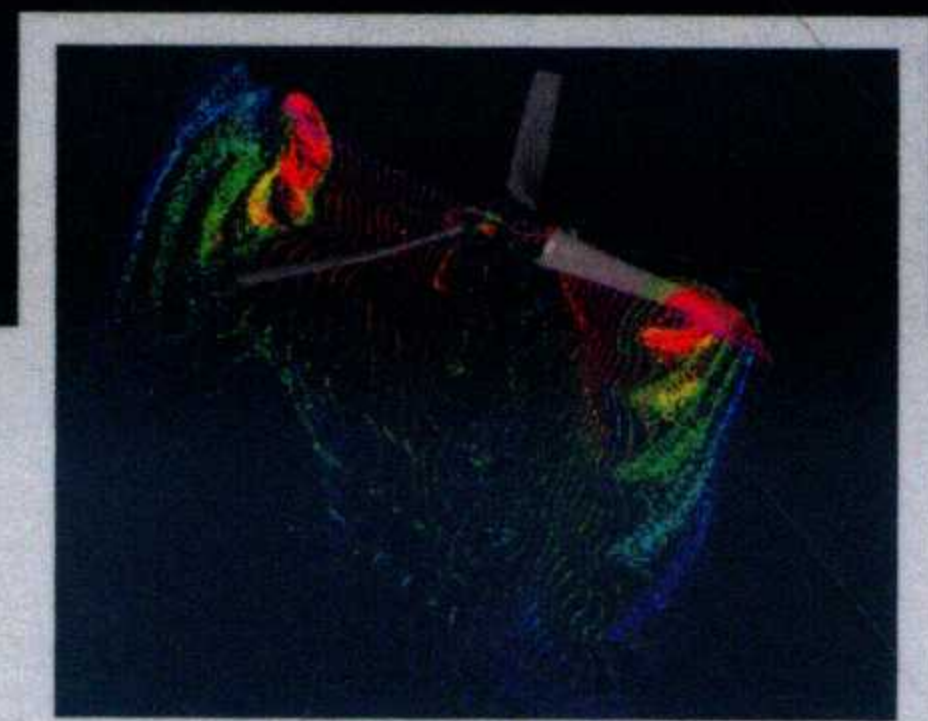





# 柔性体流固耦合运动 问题研究

非外借

思莹◎著



 武汉理工大学出版社  
WUTP Wuhan University of Technology Press

# 柔性体流固耦合运动问题研究

王思莹 著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

## 内 容 简 介

本书从鱼游运动和旗帜摆动等常见的自然现象出发,凝练柔性体流固耦合运动的物理模型,利用纸张和塑料薄膜的风洞实验、蚕丝丝线的肥皂膜水洞实验以及数值模拟计算等手段对单个和多个柔性物体在运动流场中的耦合运动模式和力学特性进行了深入研究。书中对相关实验手段、数值方法等进行了详细介绍,呈现的研究成果可帮助读者增进对流固耦合机制的了解。

本书可供从事流固耦合相关问题研究的科研人员及力学专业的大专院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

柔性体流固耦合运动问题研究/王思莹著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5629-5650-1

I. ①柔… II. ①王… III. ①柔性材料-耦合-研究 IV. ①TB391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 091186 号

项目负责人:李兰英

责任编辑:刘 凯

责任校对:张莉娟

封面设计:匠心文化

出版发行:武汉理工大学出版社

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:9.75

字 数:123 千字

版 次:2018年6月第1版

印 次:2018年6月第1次印刷

定 价:59.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87785758 87384729 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

# 前 言

柔性体在运动流体中的流固耦合问题广泛存在于生物运动和人类生产、生活中。这一类流固耦合问题同时涉及流体力学、材料力学、结构动力学、计算力学和实验力学等多个交叉学科的知识,具有较大的研究难度。对这类问题的深入研究可以帮助我们了解流固耦合机制,为人类进一步认识自然界提供理论基础,为相关工程开发和国防应用提供技术支持。

本书从鱼游运动和旗帜摆动等常见的自然现象出发,建立了柔性体流固耦合运动的物理模型,以塑料薄膜和蚕丝丝线为研究对象,利用低速风洞和肥皂膜水洞等实验设备,对不同流场条件下的柔性体耦合运动和力学特性进行了实验观测。本书还开发了一种计算二维柔性体与流体耦合问题的数值模拟算法,利用该算法对不同参数范围内的单个及多个柔性体在均匀流场和卡门涡街流场中的流固耦合问题进行了数值模拟计算,分析了各控制参数对柔性体运动及力学性能的影响机制。这些研究成果将推动柔性体流固耦合相关问题的研究进程。

本书的研究工作由中国科学技术大学尹协振教授指导,主要研究工作和书稿的撰写任务由王思莹完成,测力天平研制和旗帜摆动的测力实验主要由孙传宝完成,肥皂膜水洞的搭建和参数测量由贾来兵完成。本书的研究工作得到了国家自然科学基金(项目编号:51479007,11102027)、中央高校基本科研业务费专项资金(WUT:2017 IVA 065)的资助,本书由武汉理工大学新材料力学理论与应

用湖北省重点实验室资助出版。在此,向为本书出版付出辛勤劳动的相关人员和组织机构表示真挚的感谢。

由于作者水平有限,对很多理论和技术问题的认识还比较浅显,内容难免有疏漏之处,诚恳希望读者给予指正。

王思莹

2017年5月

# 目 录

<b>1 柔性体流固耦合问题的研究背景和现状</b> .....	1
1.1 现实中的柔性体流固耦合问题 .....	1
1.2 柔性体流固耦合问题的简化 .....	2
1.3 柔性体流固耦合问题的研究现状 .....	5
<b>2 实验设备和数值方法</b> .....	10
2.1 低速风洞实验 .....	10
2.2 肥皂膜水洞实验 .....	17
2.3 数值模拟方法 .....	25
2.4 本章小结 .....	43
<b>3 单个柔性体在均匀流场中的运动</b> .....	44
3.1 柔性旗帜运动实验 .....	44
3.2 柔性旗帜摆动测力实验 .....	48
3.3 数值模拟 .....	52
3.4 本章小结 .....	67
<b>4 两相同柔性体耦合运动的实验研究</b> .....	70
4.1 并排丝线耦合运动实验 .....	71
4.2 并排旗帜耦合运动实验 .....	75
4.3 并排摆动旗帜测力实验 .....	84
4.4 其他排列方式的旗帜耦合运动实验 .....	90
4.5 本章小结 .....	95
<b>5 两个柔性体流固耦合运动的数值模拟研究</b> .....	97
5.1 相同柔性体的耦合运动 .....	98

---

5.2	不同长度的柔性体耦合运动 .....	116
5.3	不同刚度的柔性体耦合运动 .....	121
5.4	本章小结 .....	124
<b>6</b>	<b>柔性体在非均匀流场中的运动 .....</b>	<b>127</b>
6.1	鲫鱼在卡门涡街中的运动实验 .....	128
6.2	丝线在圆柱上游运动 .....	130
6.3	丝线在圆柱下游运动 .....	133
6.4	本章小结 .....	142
	<b>参考文献 .....</b>	<b>143</b>

# 1

## 柔性体流固耦合问题的研究背景和现状

### 1.1 现实中的柔性体流固耦合问题

柔性体和流体的耦合现象广泛存在于自然界中。如日常生活中常见的旗帜随风飘扬,狂风中树木的摇摆,收获季节里田野上的层层麦浪及水草随水流的摆动等都是柔性物体在周围流体作用下产生的耦合运动。工程应用中同样存在很多柔性体和流体相互耦合运动的应用问题。如在纸和薄膜的生产印刷过程中,高速运动的纸张和薄膜的过度摆动可能引起产品折皱甚至破碎;水下电缆、管道在海潮诱导下的摆动及高压输电线在风载中的诱导振动都可能带来安全隐患;密集布置的高层建筑物在设计和建造过程中需要考虑风载荷作用下可能发生的变形和振动;生物医学中,打鼾是气流引起口腔软腭的振动所致,心脏瓣膜的开合及关系到人类繁衍的精子运动也都属于柔性体与流体耦合运动的范畴。柔性体与流体的耦合问题存在于人类生活和科学研究的各个领域,研究这个问题对人类认识自然以及工程应用都有着重要意义。

此外,自然界中各种鱼类、鲸类的游动和鸟类、昆虫的飞行都是通过身体的运动部件(如尾鳍、胸鳍或翅膀等)与周围流体(水或者空气)的相互作用来实现的。动物经历若干亿年进化获得的各具特色的游动和飞行能力,是当前人造飞行器或者水下航行器所无法比拟的。基于国民经济建设与国家安全等需求开展的仿生学研究在



国际上日益受到高度关注。另一方面,随着社会经济的高速发展,人们的生态环境保护意识逐渐增强,生物保护措施的制定需要以对生物行为习性和运动特征的全面了解作为支撑。从仿生应用和生态保护的角度出发,有必要深入开展各种流场环境下的鱼游鸟飞等生物运动力学机理的研究。而游动和飞行的生物体一般都是柔性体,因此开展柔性体与流体的耦合运动研究成为生物运动力学研究中一项关键课题。

自然界环境复杂多变,在不同流场环境中,生物体的运动模式会有所不同。生物学家观察到鱼类游动时身体与鳍之间的相对运动,昆虫飞行时多副翅膀运动的频率、振幅和相位差之间的相互关系都有固定规律<sup>[1,2]</sup>。研究还表明,鱼类成群游动、鸟类列队飞行等排列有序的群体运动可以有效地提高运动效率,降低能耗,增强群体的迁徙能力<sup>[3-5]</sup>。因此,非均匀流场及多个柔性体的排列方式等因素对柔性体流固耦合运动机制的影响具有重要的研究意义。

和刚体-流体的流固耦合问题不同,柔性体的特征是抗弯刚度较小,在与流体作用过程中易产生大位移变形,与流场有较大的交互影响。柔性体在运动流体诱发下的耦合运动不单与流体性质、来流速度、紊流结构有关,还受到固体结构本身密度、抗弯刚度、黏弹性等材料特性的影响。该问题的求解同时涉及流体力学、材料力学、结构动力学和计算力学等学科的知识,耦合机制复杂,影响因素多。求解此类问题必须同时求解流体运动方程和柔性体变形运动的高阶偏微分控制方程,研究难度较大。

## 1.2 柔性体流固耦合问题的简化

柔性体的流固耦合现象虽然广泛存在,但其机制复杂:固体的变形运动作为边界条件改变周围流场,同时流场作用在固体表面的

压力和阻力又影响固体的变形运动,二者同时作用,难以分离。流体和固体边界的相互耦合作用使得求解固体方程时必须考虑流场压力的改变,同样,求解周围流场时也不能忽略固体边界的影响。因此对于这类问题,必须同时求解流体和固体控制方程。由于早期实验技术和计算能力的限制,对这一问题的研究一直进展缓慢。但随着实验手段和科技水平的发展,对一些简单的柔性体流固耦合模型的研究工作也逐步展开。下面以鱼游运动为例,简述科研工作者为了研究这类问题对模型的简化过程。

如图 1-1 所示,鱼游运动是由鱼体在周围流体压力下的被动变形和鱼自主控制的肌肉收缩共同实现的。每个鱼体如何对周边流体环境进行探测感知,如何通过神经控制其肌肉收缩和身体运动的过程是生物学家主要关注的方向。力学工作者主要关注鱼类在不同来流条件下的运动方式和受力情况,即周围流场如何引起鱼体变形和运动,同时鱼体的变形和运动怎样引起流场变化的柔性体流固耦合问题。而从力学的角度对鱼游运动进行研究,一般从以下几个方面来对模型进行简化:

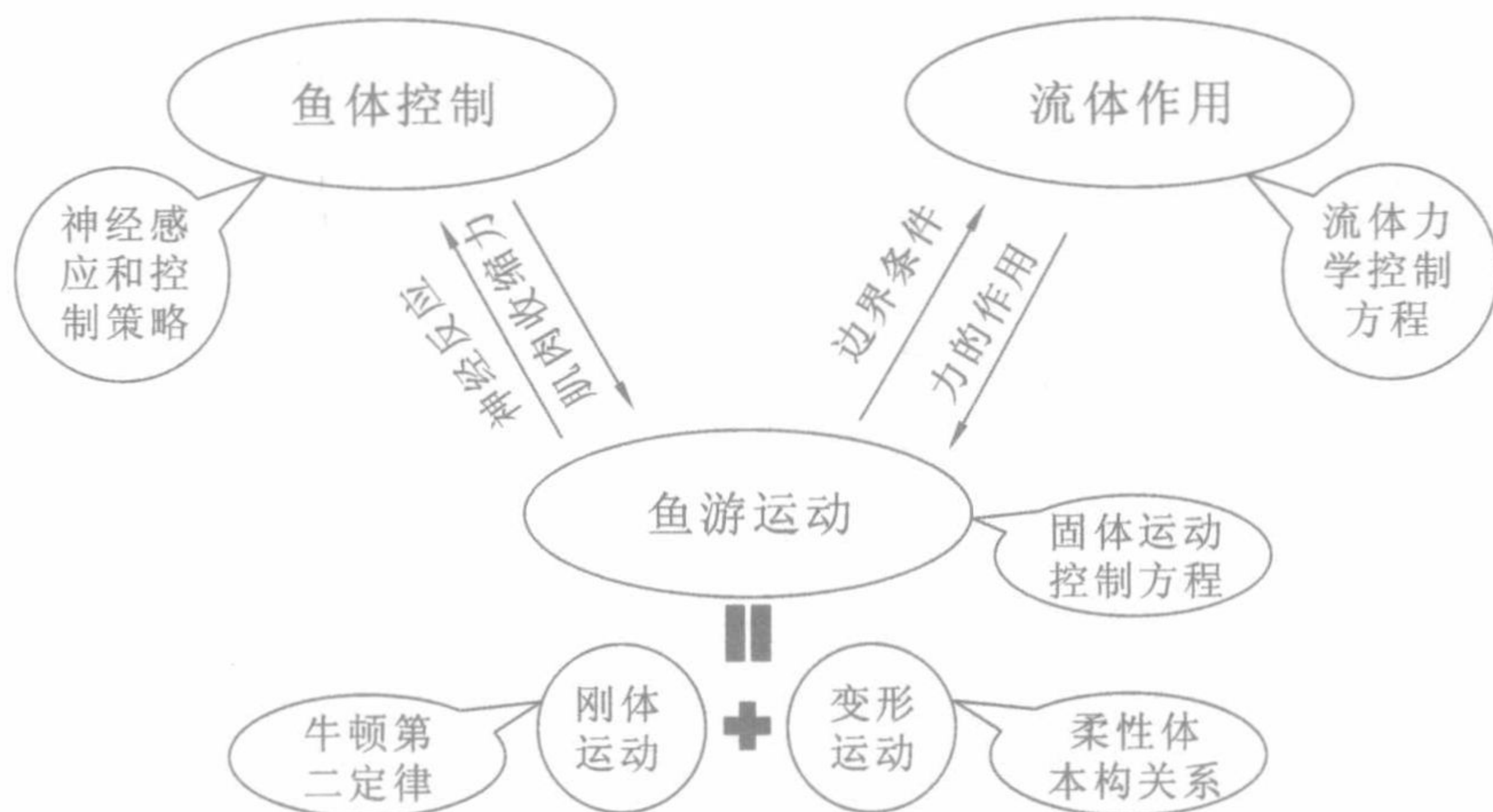


图 1-1 鱼游运动系统

### 1. 固体模型

鱼类等生物体各部位的结构和材料组成直接影响其本构关系和运动控制方程。生物结构组成和材料组织复杂多样,通常具有复合结构,材料各向异性,而且具有十分复杂的非线性黏弹性。研究生物运动时对生物体的结构组成和材料参数进行一系列简化是必需的。最初研究者不考虑生物体的变形,将生物体或运动部件简化成刚体模型来对待,如将鱼体简化成翼型<sup>[6]</sup>,将鱼尾和昆虫翅膀简化成均匀平板<sup>[7-9]</sup>等。随着研究工作逐步推进,才逐渐考虑到生物体的柔性特征,人们开始把生物体和生物运动部件简化为结构简单的变形体模型来研究<sup>[10,11]</sup>。目前在流固耦合研究中大多数仍采用材质均匀分布的单质弹性材料模型,少数工作开始涉及材料的黏弹性<sup>[12,13]</sup>。

### 2. 流体模型

流体部分一般采用牛顿流体模型,具体的模型有如下几种:一是研究微小生物低雷诺数( $Re$ )运动时忽略流体惯性力,如抗力理论<sup>[14]</sup>;二是研究高雷诺数游动时采用无黏不可压流体模型,如细长体理论<sup>[15]</sup>、二维波动板理论<sup>[16]</sup>和三维波动板理论<sup>[17]</sup>;三是采用黏性不可压流体模型,如纳维-斯托克斯(N-S)方程的差分方法及近期发展的内置边界法<sup>[18]</sup>和格子-玻尔兹曼方法<sup>[19,20]</sup>等。

### 3. 耦合过程

柔性体的流固耦合问题涉及流场的流动、固体的刚体运动和变形运动、流固边界作用力、固体内部弹性力、黏性力、主动控制力等因素的耦合求解。耦合的简化就是将上述某些因素不予考虑或者作为已知条件给出,只对剩余部分进行耦合求解,从而达到简化问题的目的。按照由简至难的发展趋势,对鱼游运动流固耦合过程的研究经历了以下几个阶段:①给定来流和鱼游运动规律,求解流体力学方程,计算流体对固体产生的作用力<sup>[21]</sup>。在这一阶段,鱼体变形和运动仅仅作为流体边界条件出现,并没有真正意义上的耦合过

程。②给定鱼体的变形运动方式,研究鱼体在静水中的自主游动问题<sup>[22,23]</sup>。这一阶段除利用流体力学方程之外还通过牛顿第二定律求解固体的刚体运动,实现了部分耦合。③给定固体本构方程求解物体在流体中的被动变形<sup>[24]</sup>。本阶段直接耦合求解流体方程和固体变形方程,实现了柔性体流固耦合问题的直接求解。在此基础上,逐步考虑固体的主动控制因素、生物材料复合结构、材料黏弹性等是柔性体流固耦合运动问题研究的发展趋势<sup>[25,26]</sup>。

本书所研究的柔性体流固耦合问题,不考虑柔性物体的主动控制、三维效应、材料黏性、流体可压缩性等因素,将柔性体简化成质量均布、等抗弯刚度的悬臂梁结构,耦合求解梁的振动方程和流体力学方程,实现柔性体-流体耦合运动的直接求解,主要考察流体与固体的密度比、来流速度、固体抗弯刚度、流场结构和多个物体排列方式、排列间距等因素对柔性体流固耦合运动机制的影响。

### 1.3 柔性体流固耦合问题的研究现状

随着实验技术手段和计算机科技水平的不断发展,近几十年科研工作者从生产生活中的不同问题出发,对柔性体流固耦合问题进行了一系列的实验观测、理论分析和数值模拟研究。

#### 1.3.1 均匀来流中单个柔性体的流固耦合问题

为了分析机翼自激振动的稳定性及其气动机理,Theodorsen<sup>[27]</sup>于1935年基于势流理论对单个柔性平板在均匀来流中的稳定性进行了理论分析,开启了人们对柔性体流固耦合问题的研究。在此基础上,Kornecki等人<sup>[28]</sup>对二维不可压流体中不同边界条件下的平板运动进行了更系统的理论分析。

为了研究人类打鼾问题,1995年Huang<sup>[29]</sup>将人类打鼾时呼吸

道中软腭的振动问题简化成柔性薄板的流激振动模型,进行了薄板在均匀来流中的振动实验,开始了对柔性体流固耦合运动的探索研究。2000年Zhang等人<sup>[30]</sup>利用肥皂膜创造的二维均匀流场和卓越的流动显示功能,观测了二维肥皂膜流场中丝线运动模式随来流速度的变化规律,发现丝线在均匀来流中存在静止、摆动和双稳态三种状态。Watanabe<sup>[31]</sup>观察了不同展长比、密度比、材料参数的纸薄板在均匀来流中的运动情况,总结了纸张临界稳定速度以及起振以后的摆动模态、速度和频率与来流速度及纸张本身材料参数的关系。2005年Shelley等人<sup>[32]</sup>首次在水洞中进行了重旗摆动实验,Schouveiler等人<sup>[33]</sup>在风洞中做了大密度比硅树脂纤维的摆动实验,给大密度比下柔性体的流激振动稳定边界、振动频率提供了实验数据。随着研究的逐渐深入,大家开始关注旗帜摆动的三维效应,通过不同展长比的旗帜的吹风实验,对比分析了旗帜展长比对其摆动三维效应的影响<sup>[34,35]</sup>。近几年测力技术的发展,使得对运动流场中柔性体受力情况的分析也成为现实<sup>[36,37]</sup>。

除了实验观测,Huang<sup>[38]</sup>还对薄柔性板在均匀来流中的二维振动问题进行了理论数值分析。他定义了主导这一流动诱导振动固体问题的两个无量纲控制参数:固体与流体介质的质量比和流动与波动的速度比。通过初值问题分析了薄板在流体中的稳定性,确认了柔性板在周围流体流速超过一定值之后会失稳由静止状态进入振动状态,并模拟了柔性板从静止稳定到周期性摆动的转换过程。Zhu等人<sup>[39]</sup>用浸润边界法(Immersed Boundary Method)模拟了肥皂膜中的丝线摆动实验,尽管选择的参数与实验存在差别,但计算得到的数值模拟结果与实验结果定性一致:①当丝线足够短时,丝线可能在来流中保持静止;②做周期性摆动的丝线振幅随着其密度的增大而增大;③丝线很长时存在双稳态,丝线的运动形态由其初始条件决定。随着数值模拟方法不断成熟,科研工作者开发了不同类型的流固耦合计算方法和程序,实现了对不同参数范围下

柔性体在运动流体中的运动和受力情况的模拟,针对单个柔性体在运动流体中的稳定边界、摆动模态、尾涡结构、受力情况等进行了对比分析,考察了流固体密度比、抗弯刚度、阻尼系数、雷诺数( $Re$ )、流体黏性等参数对柔性体流固耦合运动的影响规律,在本问题的稳定边界、摆动特征、模态转换等方面基本达成了共识<sup>[39-50]</sup>。

### 1.3.2 复杂流场中单个柔性体的流固耦合运动

现实中的流场复杂多变,极少出现实验中人为创造的均匀流场。不同流场环境下,生物采用的运动模式和控制策略也截然不同。针对生物在不同流场环境中的运动形态,科学家设计了一系列实验来进行研究。研究表明,鱼类游泳行为与漩涡有着密切的关系,漩涡对鱼类游泳行为的影响取决于单个漩涡大小与鱼类体长之间的相对尺寸<sup>[51]</sup>。鱼类在圆柱前后流场中的运动实验进一步表明,当鱼类处于圆柱上游时,其摆动幅值明显低于在相同速度的均匀流场中游动时的摆动幅值;当鱼处于圆柱后的卡门涡街中时,其摆动形态更是发生显著变化,摆动频率与圆柱脱涡频率同步<sup>[52,53]</sup>。计算分析还表明,不管是具有主动控制能力的活鱼还是完全被动变形的死鱼都具有从卡门涡街中汲取能量的能力<sup>[54-56]</sup>。不仅是具有自主控制能力的鱼类,被动变形的柔性丝线同样具有利用漩涡流场获得推力的能力。贾来兵<sup>[57]</sup>在肥皂膜水洞中观察了柔性丝线在圆柱尾迹中的运动和受力情况,发现丝线在圆柱尾迹中存在三种运动模态:在远离圆柱的卡门涡街中,丝线以圆柱脱涡的频率在漩涡中穿行并受到阻力;在近尾迹区中,丝线获得推力;介于二者之间的区域时,丝线间歇地前后运动。王思莹<sup>[24,58]</sup>对这一问题进行了数值模拟计算,得到了柔性丝线能够从卡门涡街中汲取能量获得推力的结论。Alben<sup>[59,60]</sup>和 Tian 等人<sup>[61]</sup>分别对圆柱前后流场中的柔性体运动进行了数值模拟研究。研究表明,在圆柱前后形成的非均匀

流场中,柔性体的稳定性和运动特性与自由来流中均存在很大差别。

### 1.3.3 均匀流场中多个柔性体的流固耦合运动

流体中多个柔性体耦合运动的数值模拟在单个柔性体的流固耦合基础上增加了多个固体运动之间的耦合,是“固体-流体-固体”三者甚至更多对象之间耦合的问题。

多个柔性体在流场中有并行、串行、交错等多种排列方式。Zhang 等人<sup>[30]</sup>首次设计实施了肥皂膜水洞中两并行排列丝线的耦合摆动实验。观测结果表明当丝线距离较近时表现为同向摆动(In phase mode),距离较远时呈反向摆动(Out of phase mode),并且反向摆动的频率比同向摆动的频率高 35%。随后不同参数范围内的并排柔性体的流固耦合运动实验和数值模拟研究结果表明,除上述同向摆动、反向摆动耦合运动模态之外,两个并行排列在均匀流场中的相同柔性体还可能呈现静止(Stretched straight mode)、过渡(Transition mode)和不确定相位摆动(Indefinite mode)等耦合状态<sup>[24,62-67]</sup>。其中处于过渡状态时,两个柔性体的摆动不再是单周期振动,而是振幅交替增加的含有两个主频率的耦合运动。理论分析结果表明两相同并排柔性体在运动流体中的耦合运动模态的选择受三个无量纲参数影响:流体和固体密度比,流动和波动的速度比以及无量纲间距。但各种模式出现的临界参数图谱还有待进一步的深入研究。

柔性体在流场中运动时尾迹中产生漩涡结构对下游物体的运动会产生较大影响,相对而言,串行柔性体的耦合机制更为复杂。贾来兵<sup>[57,68]</sup>利用肥皂膜水洞实验和理论分析手段,讨论了两根串行排列的丝线在不同间距时的摆动模态和能量分布,分析结果表明处于漩涡结构中的下游丝线可以从上游丝线的尾迹中汲取能量。国外研究者的类似实验结果却表明当两丝线串行排列在均匀流体

中时,后面的丝线受到阻力增大,前面丝线反而受到较小的阻力<sup>[69]</sup>。这两个实验的区别在于柔性丝线头部的固定方式有少许不同,结果却截然不同,个中机理有待进一步研究。近几年针对前后排列的柔性体在流场中的耦合运动开展了一些数值模拟分析<sup>[70-72]</sup>,研究结果一致表明两前后排列的柔性体脱出尾涡的相位差对二者耦合运动模态和受力情况存在较大影响。

近期,还有一些科研工作者开始对两个不同柔性体或三个及以上柔性体在运动流场中的耦合运动进行了探索研究,得到了一些初步的有意思的结果<sup>[64,73-75]</sup>。

总体来说,对运动流体中多个柔性体的耦合运动以及非均匀流场中柔性体运动问题的研究工作尚处于起始阶段,缺乏大量的实验数据和切实有效的数值理论研究方法。本书主要介绍笔者在这些方面的一些研究进展。由于该类问题涉及的控制参数太多以及各种理论模型的局限性等,该问题的解答还有待科研工作者的进一步努力。



# 2

## 实验设备和数值方法

科学家通常利用风洞或者水洞创造各种流场条件来进行流体力学相关的实验测量和研究。利用风洞创造的空气流场,以金属、纸张、塑料、树脂纤维等为柔性体研究对象,可以进行不同参数范围内的柔性体流固耦合问题的稳定性、运动特性和力学特性的实验研究。而水洞能实现的流速较小,由于水的密度大,常见材料制成的柔性旗帜与流体的密度比值较小,在一般水洞中很难出现旗帜失稳现象,因此相应的实验研究也很难实现。经过科研工作者的不断创新和改进,一种新兴的可持续流动的肥皂膜水洞装置被用来进行柔性体流固耦合问题的研究。这种肥皂膜水洞可以产生稳定均匀的二维流场,而且由于肥皂膜厚度变化可反映流场信息,因此利用该设备进行试验观测时可以获得清晰直观的流动显示图像,为相关问题的观测和分析提供了可行性。同时随着计算机技术的高速发展,通过数值计算的方法来进行柔性体与流体耦合运动问题的理论分析和模拟研究成为当前的一个热点。本书研究内容包括低速风洞中的旗帜运动和测力实验,肥皂膜水洞中的丝线运动实验,及自主开发数值算法对柔性体流固耦合问题进行模拟分析。

### 2.1 低速风洞实验

风洞中的柔性体运动实验涉及的主要设备包括:低速风洞及其控制系统、高速摄影系统、测力天平、数据采集和分析处理系统等。