



# 新型水下航行器

## ——仿生机器鱼的设计与制作

钱卫国 孔祥洪 主编



科学出版社

# 新型水下航行器 ——仿生机器鱼的设计与制作

钱卫国 孔祥洪 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍仿生水下航行器的几种基本类型, 简要分析目前国内外一些比较典型的仿生机器鱼案例。根据研究团队多年来在仿生水下航行器领域的探索和实践, 着重对如何设计和制作仿生机器鱼进行较为详细的阐述。主要内容包括仿生水下航行器——仿生机器鱼的外形结构设计、机器鱼动力的常用传感器、动力设计、控制系统设计以及通信技术等。

本书为有志于探索研制水下航行器的人员提供基本的方法, 也为相关的水下航行器爱好者和研究者提供一定的借鉴。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型水下航行器: 仿生机器鱼的设计与制作/钱卫国, 孔祥洪主编. —北京: 科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-056667-6

I. ①新… II. ①钱… ②孔… III. ①可潜器—仿生机器人—设计 ②可潜器—仿生机器人—制作 IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 040032 号

责任编辑: 陈 露 / 责任校对: 崔向琳  
责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靛

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 250 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《新型水下航行器——仿生机器鱼的设计与制作》

## 编委会

主 编

钱卫国 孔祥洪

副主编

王伟杰 卢克祥 宋自根 张 硕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王伟杰 孔祥洪 卢克祥 主翔宇  
许 庆 李瑞怀 邱 瑾 何元浩  
宋自根 张小宇 张 硕 钱卫国  
戴明云

# 前 言

水下航行器作为海洋研究的新型载体,在人类研究海洋的过程中发挥着不可替代的作用。随着海洋深层作业任务趋向复杂化,仿海洋生物(仿生)水下航行器诞生,作为仿生学、流体力学、材料力学、工程力学、无线信号传输及机器人设计与制造的交叉学科,仿海洋生物水下航行器具备海洋生物的推进效率高、空间噪声低、流体扰动弱、机动性能好等诸多优点,受到越来越多的关注。

在鱼类推进机理和仿生机器人研制方面,国内起步较晚。但随着国外仿生机器鱼研究的兴起,以及我国高速发展的经济对进一步开发近海直至远洋的迫切需求,越来越多的科研机构开始从事这方面的研究工作。目前,国内主要有北京航空航天大学、中国科学院自动化研究所、中国科学院研究生院、中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、哈尔滨工程大学等开展了仿生机器鱼的研制工作。上海海洋大学水下航行器技术组,根据多年的实践经验,依据鱼类仿生实验室,指导了大量大学生兴趣小组进行水下航行器的研发,研制了仿常见鱼类航行器、仿海龟航行器、仿蝠鲼航行器、仿海蛇航行器、仿鱿鱼航行器等,并在全国大学生创新创业年会、“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛、全国海洋航行器设计与制作大赛、智海 OI 中国水下机器人大赛等诸多赛事中斩获国家金奖、特等奖、一等奖等诸多荣誉,得到同行及相关研究者的高度肯定。

本书基于上述各种仿海洋生物航行器的制作经验,对该类水下航行器的设计和制作过程进行详细的阐述,包括外形结构设计、传感器选择和配置、驱动装置设计、控制系统设计、通信设计与人机交互界面设计等。拟为有志于探索、研制水下航行器的人员提供基本的方法,也为相关的水下航行器爱好者和研究者提供一定的借鉴。当然,由于编者水平有限,本书不当之处恳请读者批评指正。

本书共 6 章,第 1 章“仿生水下航行器”主要讲述仿生水下航行器的分类、关于推进机理的几种主流理论、仿生推进器系统设计原则以及常见仿生水下航行器简介等,由钱卫国、王伟杰、主翔宇编写。第 2 章“仿生机器鱼外形结构设计”主要讲述如何使用 SolidWorks 软件进行建模设计、流体性能分析、外形设计原则及制作方法与几种机器鱼的建模等,由孔祥洪、张硕、宋自根、许庆、戴明云编写。第 3 章“传感器”主要讲述传感器概论、传

感器分类、常用传感器以及物理海洋传感器，由孔祥洪、卢克祥、许庆、张小宇、李瑞怀编写。第4章“机器鱼动力设计”主要讲述推进装置、推进电机、机器鱼动力结构设计等，由王伟杰、卢克祥、何元浩编写。第5章“控制系统的设计”主要讲述供电模块、单片机最小系统、舵机控制系统、控制电路和仿真电路等，由钱卫国、孔祥洪、主翔宇、邱瑾编写。第6章“通信技术”主要讲述通信系统概述、常用关系式、惯性导航、信号调制、通信系统主要性能、航行器通信技术特点等，由孔祥洪、宋自根、主翔宇、张硕、卢克祥等编写。全书由钱卫国、孔祥洪统稿。

本书的出版得到上海海洋大学“085”专项、教育部卓越农林人才教育培养计划改革试点项目“海洋渔业科学与技术本科教学改革”、上海海洋大学渔具渔法课程群探究型教学团队建设项目和上海市精品课程“鱼类行为学概论”的资助。特此感谢。

编 者

2018年3月

# 目 录

前言	
第 1 章 仿生水下航行器	1
1.1 仿生水下航行器的分类	2
1.2 关于推进机理的几种主流理论	2
1.3 仿生推进器系统设计原则	3
1.4 常见仿生水下航行器简介	3
1.5 仿生机器鱼的关键研究技术	25
第 2 章 仿生机器鱼外形结构设计	26
2.1 设计软件	26
2.2 流体性能分析	33
2.3 外形设计原则及制作方法	43
2.4 外形建模案例	47
第 3 章 传感器	51
3.1 传感器概论	51
3.2 传感器分类	51
3.3 常用传感器	52
3.4 物理海洋传感器	58
第 4 章 机器鱼动力设计	61
4.1 推进装置	61
4.2 推进电机	63
4.3 机器鱼动力结构设计	87
4.4 机器鱼动力设计案例	92
第 5 章 控制系统的设计	97
5.1 供电模块	97
5.2 单片机最小系统	98
5.3 舵机控制系统	101
5.4 控制电路	105

---

5.5	仿真电路	107
5.6	机器鱼控制系统设计案例	108
<b>第 6 章</b>	<b>通信技术</b>	<b>117</b>
6.1	通信系统概述	117
6.2	常用关系式	118
6.3	惯性导航	122
6.4	信号调制	132
6.5	通信系统主要性能	133
6.6	海军通信技术特点	134
6.7	航行器通信技术特点	135
6.8	水声通信技术	135
6.9	水上无线电通信技术	141
6.10	卫星通信技术	142
6.11	光缆通信技术	145
	参考文献	151



# 第 1 章 仿生水下航行器

我国陆地资源人均值低于世界平均水平，随着国家经济的持续、稳定、快速发展，现有的陆地资源开发利用形势更加严峻。海洋具有丰富的开发利用潜力，包含极大的生物资源、矿产资源、能源、水资源、空间资源等，是巨大的自然资源宝库。合理利用、开发和监测海洋资源，是我国 21 世纪发展的需要。

无人水下航行器（unmanned underwater vehicle, UUV）作为一种水下无人智能移动平台，在探索海洋资源、海洋科学考察和军事等领域有广阔的应用前景及巨大的潜在价值。无人水下航行器技术涉及多门学科和多个技术领域的知识，水下推进技术是关键技术之一。目前国内外常见的无人水下航行器多采用传统的螺旋桨推进器。螺旋桨推进技术在实际应用中有着不可替代的优势，理论研究和实际应用都已经比较成熟，但其自身亦存在不足，如噪声大、对环境扰动大、运动灵活性和隐蔽性较差等，应用场合受到限制。考虑到海洋科学考察中海底地形复杂，存在暗流、浪、涌区域，以及要完成海洋参数的测量、海地信息的调查和定点作业等任务，采用传统的螺旋桨推进，以鳍舵进行操纵控制的运动方式已经无法满足这类特殊应用的要求。为了提高水下机器人的运动能力，人们不断研究新型的推进方式，探索适用于水下航行器的运动学机理。20 世纪 90 年代以来，随着仿生学、流体动力学、机器人学的进步，计算机、传感器和智能控制技术的快速发展，以及新型材料的不断涌现，人们将目光投向水生动物的运动机理研究，试图通过仿生推进的研究提高航行器的运动能力。

在自然界中，水生生物在经过大自然的百万年进化和选择之后，其运动方式的噪声小，机动性能好，能源利用率高，多数鱼类游动的流体推进效率在 80% 以上，而螺旋桨推进器的流体推进效率平均在 40%~50%。除了鱼类，还有一些水生生物具有独特的形体结构及游动方式，它们的游动方式更加成熟和完美，如海蛇、乌贼、海龟等。这些生物可本能地利用流体力学原理，减小流体阻力，提高推进力，展示出完美的游泳方式；其超凡的游泳能力是常规的水下航行器所望尘莫及的，例如，鱼类在高速游动时转弯半径仅有体长的 10%~30%，而常规的航行器的转弯半径要比体长大一个量级，且通常在转弯前先减速一半。

因此,仿生水下航行器得到许多科学家的重点研究,并将其优越性运用到水下航行器中,仿生机器鱼(简称机器鱼)的研制为水下航行器的研究和发展提供了广阔的应用空间。本章主要介绍仿生水下航行器的分类、推进机理的研究进展、仿生推进器系统设计原则、常见仿生水下航行器简介,以及仿生机器鱼的关键技术等。

## 1.1 仿生水下航行器的分类

根据莱特希尔(Lighthill)的分类,水生动物的运动方式一般可分为三大类。第一类是纤毛推进,原生动物和腔肠动物中的许多种,是依靠其体表的大量纤毛来完成运动的。第二类是射流反冲推进,腔肠动物中的类水母体纲和软体动物中的头足纲,如鱿鱼等,依靠其自身的喷流来实现运动。第三类是波状摆动推进,这是各类水生动物最广泛采用的一种游动方式,小至鞭虫那样的原生动物及微生物,中至属于水生脊椎动物的鱼类,大至海洋哺乳类动物,波状摆动推进是指其身体做横向扭曲、往复摆动,以横波的方式由前向后传播。按鱼体及其背鳍、腹鳍和尾鳍波状游动的特点,把鱼类波状摆动推进的方式细分为多种运动模式。

按照Lighthill的提法,只考虑鱼体及其尾鳍的运动,大体上又可划分为鳗鲡模式、鲹科模式和月牙尾推进模式三种。如水蛇的鳗鲡模式和鲤鱼的鲹科模式游速较高,鲨、鲸和海豚是高速游动海洋鱼类和鲸类,是月牙尾推进模式,摆幅更大,游速更高,效率更高。其巡游速度可高达20kn(1kn=1.852km/h),流体推进效率可高达80%以上。

编者在前人的理论和制作基础上提出新的仿生机器鱼的分类方法,根据鱼类游动时产生推进机理和推进力的部位不同,将其分为四类:第一类是身体波动式,第二类是喷射模式,第三类是中央鱼鳍或对鳍波动摆动(median and/or paired fin, MPF)模式,第四类是尾鳍波动(body and/or caudal fin, BCF)模式。

## 1.2 关于推进机理的几种主流理论

新型仿生机器鱼水下推进器研究的基础是对鱼类推进模式和推进机理的研究。20世纪90年代之前,主要是理论研究与模型分析;到了20世纪90年代,才开始进行仿生水下航行器样机的研制。1926年,Breder对鱼类的推进模式进行了研究。1936年,英国生物学家Gray估算出,海豚的肌肉所能提供的功率只相当于与它身体相似的刚体模型以15~20kn的速度前进时所需功率的1/7。1952年,Taylor在低雷诺数的运动情况下,忽略

惯性力的作用,采用准静态逼近的方法,以“静态流体理论”为依据,考虑流体运动黏性力的影响,提出了一种“抗力水动力学模型”。1960年,Lighthill 研究分析了鳐科推进模式,建立了关于细长形鱼类的波速、波幅、尾部摆幅以及相位等多个条件下高效游动的“细长体理论”的数学模型。1961年,Wu 将鱼类的身体看成一个富有弹性的板来,提出了“二维柔性波动板”的理论。1970~1971年,Lighthill 将自己的“细长体理论”只适用于对鱼体小振幅游泳的局限进行扩展,得到了“大摆幅细长体理论”,更适合于尾鳍推进模式。国外主要以英国的 Lighthill 和美国的 Wu 等为代表,国内主要以中国科学技术大学的童秉纲院士等发展的“三维波动板理论”为代表,把波动板理论从二维扩大到了三维。

### 1.3 仿生推进器系统设计原则

仿生推进器系统设计有四个原则。原则一,在充分理解仿生对象的生物功能结构和游泳机理的基础上,以依据高新科技工艺技术进行设计为设计原则;原则二,在整体系统结构灵巧便捷的基础上,以快速上浮、下潜能力及小转弯半径的空间巡游为控制设计原则;原则三,方便拆装、替换,防水密封要简便可靠,在尽量减少静、动密封的基础上,以模块化设计为链接设计原则;原则四,在尽量减小形体阻力的基础上,以流固耦合原理进行壳体形态的简化,将此作为优化设计原则。

### 1.4 常见仿生水下航行器简介

从生物形态学角度来分析,以鱼类运动模式与鱼鳍游动为仿生对象研制的新型水下航行器,具有更加优秀的运动性能和作业能力。仿生水下航行器主要以 BCF 模式和 MPF 模式为主导,其中,BCF 模式的研究时间长,机器人数量较多。而 MPF 模式运动复杂,研究中也发现较多困难,仿波动模式型是近几年才慢慢发展起来的,而仿喷射模式型的研究刚刚起步。

#### 1.4.1 仿波动模式型

##### 1.4.1.1 仿波动模式型水下航行器的主要特点

鳗鱼属于鳗鲡目分类下的物种总称,是一种外观类似长条蛇形的鱼类,如河鳗、鳗鲡、青鳉、日本鳗等都具有鱼的基本特征。仿波动模式型水下航行器主体游动时,几乎全部体

长都参与大振幅的波动。在波动中推进,整个身体长度至少提供了一个完整波长的推进器,使得横向力相抵消,横向的运动趋势降低到最小。通过改变身体上行波的方向,实现与向前运动一样的向后运动,通常此类鱼身体纤细,适应在狭窄空间里穿行。

#### 1.4.1.2 仿波动模式型水下航行器

1977年, Mojarrad 和 Shahinpoor 在美国新墨西哥大学进行了人工合成肌肉在仿生机器人方面的研究。在金属铂片上镀高分子电解质离子交换膜,在外加交变电场的作用下,产生类似鳗鱼的波动,并带动金属铂片一起波动,产生推进力。仿生鱼鳍金属铂片的振幅与运动速度及频率成正比,其驱动器原理如图 1-1 所示。2011年,美国东北大学的 Westphal 等用形状记忆合金研制了仿鳗鱼体摆动样机(图 1-2),即采用身体波动推进方式的仿鳗鱼波动式水下航行器。2007年,日本理化学研究所仿生控制研究中心的 Nakabo 等设计出由离子交换聚合金属材料(IPMC)驱动的 7 段水下蛇形机器人(图 1-3),每段之间有电气绝缘,每段上加有相位可变的正弦波电压,身体能像真蛇一样在水中摆动,能实现前行、左右转弯和后退的运动模式。2008年,日本东京理科大学研制出了仿鳗鱼水下航行器(图 1-4),用于狭窄空间航行。国内学者对这块的研究较少。2002年,北京航空航天大学梁建宏等模仿银龙鱼研制出一条具有 6 个关节的仿生鳗鱼航行器(图 1-5),航行速度可达 0.6m/s。此外,法国南特中央理工学院通信与控制研究所、瑞士联邦理工学院、比萨圣安娜高等学校和研究机构也开展了鳗鲰模式仿生水下航行器的相关研究工作。

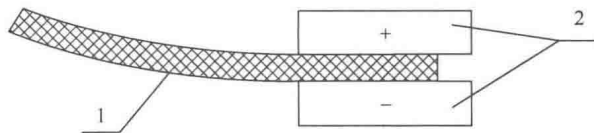


图 1-1 鳗鱼的人工合成肌肉波动驱动器原理图

1-IPMC-Pt 合成致动器; 2-电极



图 1-2 美国东北大学的仿鳗鱼体摆动样机

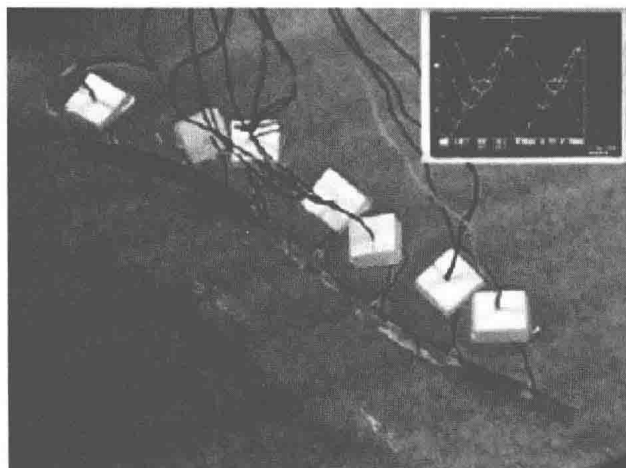


图 1-3 日本理化学研究所水下蛇形机器人

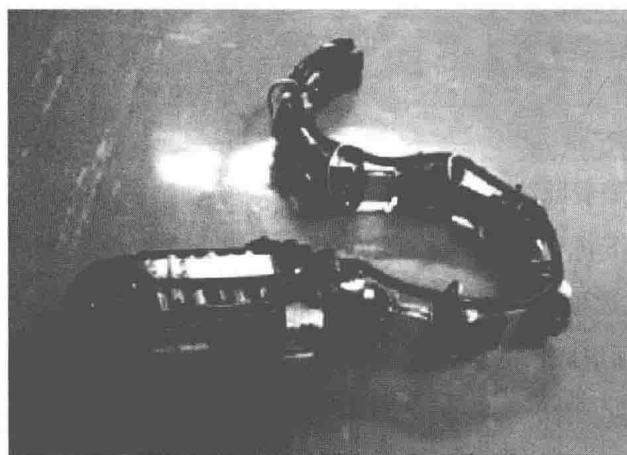


图 1-4 日本东京理科大学的仿鳗鱼水下航行器

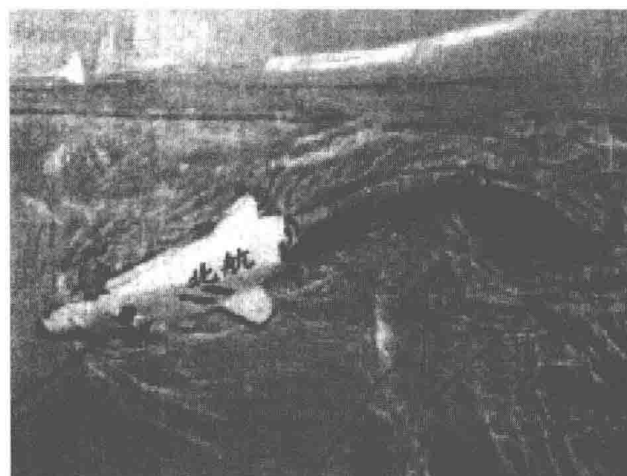


图 1-5 北京航空航天大学仿银龙鱼的仿生鳗鱼航行器

## 1.4.2 仿喷射模式型

### 1.4.2.1 仿喷射模式型水下航行器的主要特点

仿喷射模式型水下航行器与火箭的喷射推进原理相同，它们靠外套膜腔体躯干的收缩和扩张将水向外喷射。根据动量守恒原理，自身受到与喷射方向相反的作用力，典型代表有墨鱼、鱿鱼、水母等，排出外套膜腔体外的水的体积取决于外套膜的应变变量，它们在游动过程中的脉冲式喷射推进方式使其游动状态处于非定常的加减速状态。

### 1.4.2.2 仿喷射模式型水下航行器

2007年，日本香川大学的Guo等研制出应用离子导电聚合物薄膜(ICPF)材料驱动的微型水母(图1-6)，微型水母宽42mm，高68mm，质量4.81g，该模型可以实现接近5mm/s的运动速度，随着脉冲电压频率的变化，可以控制频率。2008年，德国费斯托(Festo)有限公司研制了水下仿生水母AquaJelly，它实质上是一种模拟浮游行为的自控系统(图1-7)。系统通过远程控制的气动鱼Airacuda在水中灵活游动。气动鱼由一个透明的半球和八根动力触须组成，电子和气动部件隐藏在防水的头部，它们通过两根气动肌腱控制尾部的S形运动，用于掌握方向。2007年，我国哈尔滨工业大学的王扬威等设计了仿生墨鱼航行器(图1-8)，实现了向前、向后和原地的转弯游动等功能，最大游动速度为35mm/s，与墨鱼的巡游速度接近。

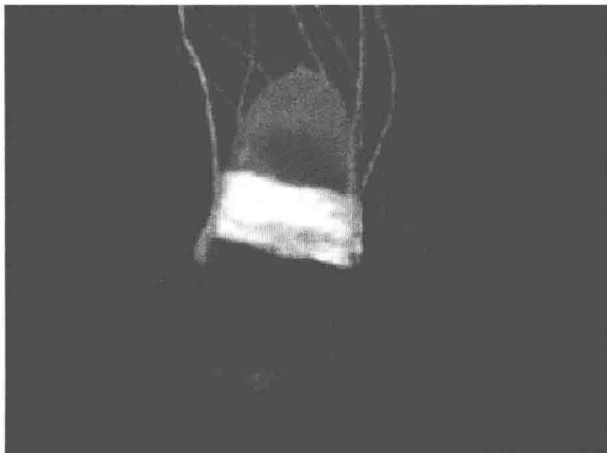


图 1-6 日本香川大学微型水母

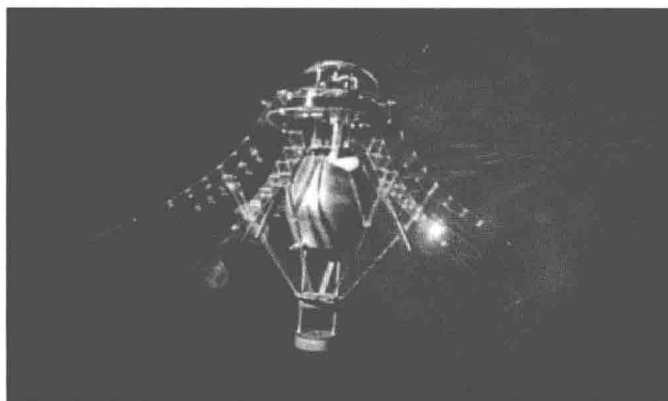


图 1-7 德国 Festo 有限公司水下仿生水母

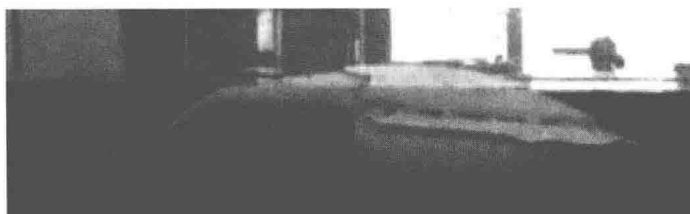


图 1-8 哈尔滨工业大学仿生墨鱼航行器

### 1.4.3 仿 MPF 模式型

#### 1.4.3.1 仿 MPF 模式型水下航行器的主要特点

以 MPF 模式游动的鱼类相对较少, 约占鱼类总数的 15%, 典型代表为鳐科、隆头鱼科等。在仿真设计与制作时又可分为两类: 一类为中央鳍, 如长背鳍和腹鳍类, 即长鳍波动推进类; 另一类为对鳍, 如成对的胸鳍和臀鳍, 大多数鱼类通过它们做平衡和转向控制, 游动较为平稳。

#### 1.4.3.2 仿 MPF 模式型水下航行器

##### 1) 仿长鳍波动推进模式型水下航行器

2001 年, 英国赫瑞·瓦特大学的 Sfakiotakis 等进行了仿长鳍波动推进器的实验研究, 长鳍由 8 个并列鳍条通过柔性薄膜连接, 通过气动驱动长鳍波动。产生的推进力与频率和波动幅度近似呈线性关系, 可通过改变行波推进方向来改变行进方向, 但因体积和惯性较大而无法得到实际应用。2002 年, 日本大阪大学 Rahman 等研制了一款仿乌贼机器鱼“Squid

Robot”，如图 1-9 所示，该机器鱼具有一对波动长鳍，每侧长鳍有 17 个伺服舵机驱动和两个尾鳍，可实现上浮、下潜等俯仰游动功能，还能进行转向和盘旋等游动。2003 年起，美国西北大学的 MacIver 等开始进行仿尼罗河黑魔鬼刀鱼的长臀鳍波动推进方式的研究，并研制了一系列仿长鳍波动推进水下航行器。2011 年，美国西北大学的 Curet 等制作了机器鱼原型样机，并进行了实验的验证。2011 年，美国西北大学与 Kinea 公司共同研发了机器鱼“Albiforms”（图 1-10），它的波动鳍由 32 根不锈钢鳍条及合成弹力纤维薄膜组成，鳍长 32.6cm，高 3.37cm，质量 2.3kg，每根鳍条由一个片状“肌肉”板控制器和一个伺服控制电机驱动。当频率为 3Hz，摆角为 30°时，会呈现两个完整推进波，速度可达 26cm/s。在我国，2005 年，国防科技大学的李非通过观察和分析魔鬼鱼鳍波动运动推进模式的游泳特点，设计了仿尼罗河魔鬼鱼的水下航行器（图 1-11），主要依靠鱼体上背鳍的运动产生推进力，但无实验样机。2005 年，新加坡南洋理工大学设计了带状长鳍推进器，以乌贼柔性波动鳍为仿生对象研制了仿乌贼波动鳍推进器（图 1-12），但存在结构不够紧凑、鳍条薄膜脱落等问题，相关研究小组在 2007 年又研制了新的仿魔鬼鱼的长鳍波动推进器，如图 1-13 所示，较好地解决了以上问题。2006 年，在日本理化学研究所和名古屋大学，由 Kentaro 和 Masanori 等设计了仿鳐鱼机器鱼（图 1-14），一对胸鳍由聚乙烯薄膜和与其相连的 8 片 IPMC 组成，并通过电压信号以不同的幅度先后摆动，实现向前推进，机器鱼的总体尺寸是长 75mm，宽 45mm，平均游动速度是  $(8.0 \pm 1.4)$  mm/s。同在 2006 年，国防科技大学和中国科学技术大学联合研究了仿弓鳍目鱼类长鳍的波动推进方式的机理，研制出基于柔性长鳍波动推进系统的仿弓鳍机器鱼（图 1-15）。2007 年，南洋理工大学的 Low 等（2008）研制出由 8 根鳍条组成“曲杆-滑块”的仿长鳍波动水下航行器（图 1-16），实现前进、上升、下潜等功能。

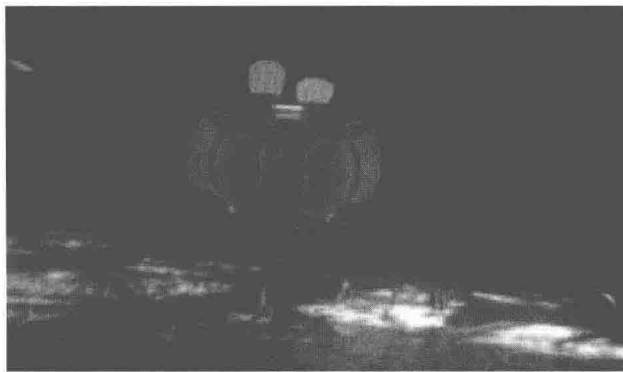


图 1-9 日本大阪大学仿乌贼机器鱼





图 1-10 美国西北大学仿尼罗河黑魔鬼刀鱼机器鱼

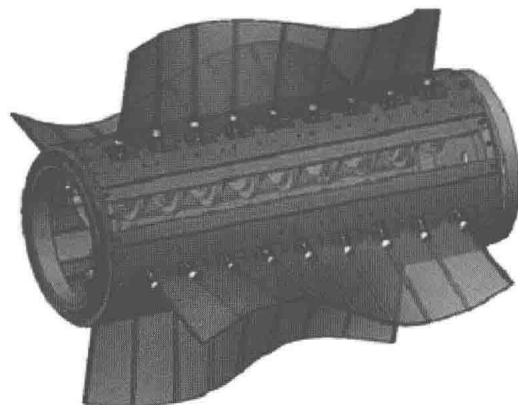


图 1-11 国防科技大学仿尼罗河魔鬼鱼

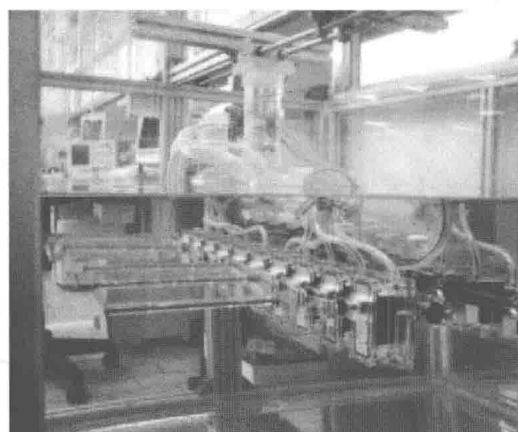


图 1-12 新加坡南洋理工大学仿乌贼波动鳍推进器

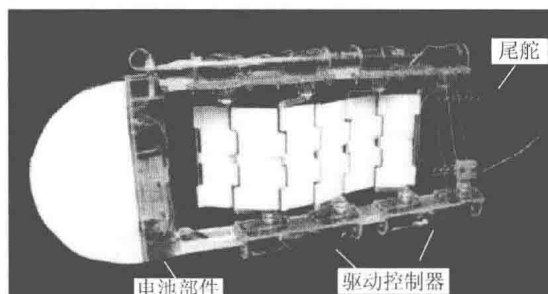


图 1-13 新加坡南洋理工大学仿魔鬼鱼波动推进器